

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dario Pongrac**

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:  
Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Student:  
Dario Pongrac

Zagreb, 2015.

## **Izjava i zahvala**

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno, služeći se stečenim znanjima i stručnom literaturom koja je navedena u diplomskom radu.

Ovom prilikom se zahvaljujem:

Mentoru doc.dr.sc. Ivici Garašiću na motivaciji, pruženom znanju, pristupačnosti, savjetima, suradnji tijekom izrade diplomskog rada.

Asistentici dr. sc. Maja Jurica (Remenar), na ukazanoj podršci, pristupačnosti, susretljivosti i vođenju kroz teorijski i eksperimentalni dio diplomskog rada.

Laborantima Krešimiru Sukobljeviću, Zdenku Batiniću i Mati Šokičiću s Katedre za zavarene konstrukcije koji su mi pomogli tijekom izvođenja eksperimentalnog rada.

Dr. sc. Damiru Ciglaru, na ukazanoj pomoći prilikom strojne obrade uzoraka.

Tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pomoći oko realizacije pojedinih ispitivanja.

Posebna zahvala majci, djevojci te ostaloj obitelji na pruženoj potpori i razumijevanju tijekom studiranja.

Od srca Vam hvala!

Dario Pongrac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DARIO PONGRAC**

Mat. br.: **0035182903**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ AKTIVACIJSKOG PREMAZA NA MEHANIČKA I  
KOROZIJSKA SVOJSTVA ZAVAREN OG SPOJA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**INFLUENCE OF ACTIVATION FLUX ON MECHANICAL AND  
CORROSION PROPERTIES OF WELD JOINT**

Opis zadatka:

Proučiti ponašanje i utjecaj aktivacijskog premaza pri TIG zavarivanju visokolegiranih nehrđajućih čelika. Analizirati mehanizme koji dovode do povećane penetracije pri zavarivanju kao i moguće negativne posljedice. Definirati komercijalno dostupne premaze i kemijski sastav najčešće primjenjivanih komponenti koje se koriste za izradu istih. Dati pregled postojećih primjera tehnologije zavarivanja uz primjenu aktivacijskih premaza.

U eksperimentalnom dijelu za određeni aktivacijski premaz osmisлити plan pokusa za definiranje mehaničkih i korozivskih svojstava zavarenog spoja od visokolegiranog nehrđajućeg austenitnog čelika. Rezultate usporediti sa istovjetnim uzorcima načinjenim konvencionalnim TIG zavarivanjem. Posebno istražiti mogućnost primjene aktivacijskog premaza za zaštitu korijenskog prolaza umjesto plina. U konačnici ocijeniti podobnost primijenjenog aktivacijskog premaza obzirom na postignuta mehanička i korozivska svojstva kao i mogućnost zaštite korijena.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.


Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

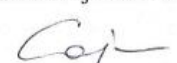
Predviđeni datum obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | IV   |
| POPIS TABLICA.....  | VI   |
| POPIS KRATICA I OZNAKA .....                                    | VII  |
| SAŽETAK.....  | VIII |
| SUMMARY .....   | IX   |
| 1. UVOD .....   | 1    |
| 2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI .....                           | 2    |
| 2.1. Općenito .....   | 2    |
| 2.2. Podjela nehrđajućih čelika .....                           | 5    |
| 2.3. Sastav i svojstva austenitnih čelika .....                 | 7    |
| 2.4. Klasifikacija, podjela i primjena austenitnih čelika ..... | 10   |
| 2.5. Zavarljivost austenitnih čelika .....                      | 14   |
| 2.6. Problemi zavarljivosti austenitnih čelika .....            | 15   |
| 3. TIG ZAVARIVANJE .....  | 19   |
| 3.1. Opis i razvoj TIG zavarivanja .....                        | 19   |
| 3.2. Stupanj automatizacije TIG zavarivanja .....               | 20   |
| 3.2.1. Ručno TIG zavarivanje .....                              | 20   |
| 3.2.2. Poluautomatsko TIG zavarivanje .....                     | 22   |
| 3.2.3. Automatizirano TIG zavarivanje.....                      | 22   |
| 3.3. Prednosti i nedostaci.....                                 | 23   |
| 3.4. Parametri kod TIG zavarivanja .....                        | 23   |
| 3.4.1. Napon i struja zavarivanja.....                          | 24   |
| 3.4.2. Protok i vrsta zaštitnog plina .....                     | 27   |
| 3.4.3. Brzina zavarivanja.....                                  | 29   |

|  |    |
|--|----|
| 3.4.4. Pištolj i dodatni materijal .....   | 30 |
| 3.5. Oprema za TIG zavarivanje .....   | 31 |
| 3.5.1. Izvor struje.....   | 32 |
| 3.5.2. Pištolj za zavarivanje.....   | 34 |
| 3.5.3. Sapnica .....   | 35 |
| 3.5.4. Elektroda .....   | 36 |
| 3.5.5. Rashladni sustav .....  | 38 |
| 3.5.6. Sustav za dovod zaštitnog plina .....   | 38 |
| 4. TIG ZAVARIVANJE UZ POMOĆ AKTIVACIJSKOG PREMAZA (A-TIG) .....                        | 39 |
| 4.1. Uvod .....  | 39 |
| 4.2. Svojstva i sastav aktivnog premaza.....   | 40 |
| 4.3. Komercijalno dostupni aktivacijski premazi.....                                   | 41 |
| 4.4. Princip rada A-TIG zavarivanja s aktivacijskim premazom .....                     | 42 |
| 4.4.1. Načini nanošenja aktivacijskog premaza .....                                    | 43 |
| 4.5. Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na dubinu penetracije .....              | 43 |
| 4.6. Prednosti A – TIG postupka i svojstva zavarenog spoja.....                        | 47 |
| 4.7. Pregled postojećih tehnologija zavarivanja uz primjenu aktivacijskih premaza..... | 48 |
| 4.7.1. TIG zavarivanje.....  | 48 |
| 4.7.2. Plazma zavarivanje.....   | 49 |
| 4.7.3. Lasersko zavarivanje .....  | 50 |
| 4.7.4. Zavarivanje elektronskim snopom .....   | 51 |
| 5. EKSPERIMENTALNI RAD .....   | 52 |
| 5.1. Opis eksperimenta .....   | 52 |
| 5.2. Osnovni materijal .....   | 52 |
| 5.3. Priprema aktivacijskog premaza .....  | 53 |
| 5.4. Oprema za zavarivanje .....   | 54 |
| 5.4.1. Izvor struje za zavarivanje.....  | 54 |

|  |    |
|--|----|
| 5.4.2. Oprema za automatiziranje postupka zavarivanja..... | 55 |
| 5.5. Zavarivanje.....                                      | 56 |
| 5.5.1. Priprema spoja.....                                 | 56 |
| 5.5.2. Postupak zavarivanja.....                           | 56 |
| 5.5.3. Parametri zavarivanja.....                          | 58 |
| 5.5.3. Zaštitni plin .....                                 | 61 |
| 5.5.4. Izbor elektrode.....                                | 61 |
| 5.5.5. Predgrijavanje.....                                 | 61 |
| 5.6. Vizualna kontrola uzoraka .....                       | 61 |
| 5.6.1. Opis postupka.....                                  | 61 |
| 5.6.2. Analiza i rezultati vizualne kontrole. ....         | 62 |
| 5.7. Makroanaliza.....                                     | 65 |
| 5.7.1. Priprema uzorka .....                               | 65 |
| 5.7.2. Rezultati i analiza .....                           | 67 |
| 5.8. Statičko vlačno ispitivanje .....                     | 68 |
| 5.8.1. Priprema uzoraka.....                               | 69 |
| 5.8.2. Rezultati i analiza .....                           | 69 |
| 5.9. Korozijsko ispitivanje .....                          | 71 |
| 5.9.1. Priprema uzoraka.....                               | 71 |
| 5.9.2. Rezultati i analiza .....                           | 72 |
| 6. ZAKLJUČAK .....   | 76 |
| 7. LITERATURA.....   | 78 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Prikaz mehanizma samoobnavljanja pasivnog filma kromovih oksida na površini [2]..... | 3  |
| Slika 2. Prikaz osnovnih strukturnih i površinskih nehomogenosti [2].....                     | 3  |
| Slika 3. Prikaz posljedica prisutnosti pojedinih nehomogenosti površine [2].....              | 4  |
| Slika 4. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [2] .....          | 5  |
| Slika 5. Podjela i značajke austenitnih čelika [10].....                                      | 11 |
| Slika 6. Proizvodi izrađeni od austenitnog čelika [12].....                                   | 14 |
| Slika 7. Prikaz ručnog TIG zavarivanja [18].....  | 21 |
| Slika 8. Shematski prikaz ručnog TIG navarivanja [19].....                                    | 21 |
| Slika 9. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [20].....                              | 22 |
| Slika 10. Utjecaj vrste plina i mješavine plinova na oblik zavara i penetraciju [25].....     | 23 |
| Slika 11. Oblik i učinak električnog luka kod helija (He) i argona (Ar) [26].....             | 29 |
| Slika 12. Položaj pištolja i dodatnog materijala kod ručnog TIG zavarivanja [21].....         | 30 |
| Slika 13. Prikaz tehnike ručnog TIG zavarivanja [21].....                                     | 31 |
| Slika 14. Oprema za ručno TIG zavarivanje [27].....   | 31 |
| Slika 15. Strma karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [26].....                    | 32 |
| Slika 16. Izvor struje za TIG zavarivanje [28].....   | 33 |
| Slika 17. Dijelovi pištolja za ručno TIG zavarivanje [29].....                                | 35 |
| Slika 18. Primjeri izgleda vrhova korištenih elektroda [32].....                              | 37 |
| Slika 19. Usporedba protaljivanja TIG i A-TIG postupka [34].....                              | 40 |
| Slika 20. Komercijalno dostupni premazi [37, 38].....   | 41 |
| Slika 21. Shematski prikaz pripreme, miješanja i nanošenja aktivacijskog premaza [37].....    | 42 |
| Slika 22. Shema postupka A – TIG i FBTIG postupka zavarivanja [38].....                       | 43 |
| Slika 23. Marangonijev efekt strujanja fluida [39].....                                       | 44 |
| Slika 24. Mehanizam kontrakcije električnog luka [33].....                                    | 45 |
| Slika 25. Makroizbrusak TIG zavara [33].....  | 49 |
| Slika 26. Makroizbrusak plazma zavara [33].....   | 50 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 27. Makroizbrusak laserskog zavarara [33].....                                      | 50 |
| Slika 28. Makroizbrusak elektronski zavarenog spoja [33].....                             | 51 |
| Slika 29. Komponente primjenjenog aktivacijskog premaza.....                              | 53 |
| Slika 30. Uređaj za TIG zavarivanje MagicWave 2200 Job [45].....                          | 54 |
| Slika 31. Uređaj za automatiziranje procesa zavarivanja „BUGO Systems“ .....              | 55 |
| Slika 32. Shematski prikaz pripreme „I“ spoja.....  | 56 |
| Slika 33. Prikaz premazane površine uzorka, premaza te pribora za nanošenje .....         | 57 |
| Slika 34. Prikaz radnog prostora kod zavarivanja uzorka.....                              | 58 |
| Slika 35. Nprovareni korijen kod A-TIG postupka ( 120 A).....                             | 59 |
| Slika 36. Provaren korijen kod A-TIG postupka (160 A).....                                | 59 |
| Slika 37. Izgled lica i korijena zavarenih uzoraka.....                                   | 63 |
| Slika 38. Usporedba deformacija zavarenih uzoraka.....                                    | 64 |
| Slika 39. Prikaz promjene vrijednosti električnog luka.....                               | 65 |
| Slika 40. Pozicije izrezivanja uzoraka za ispitivanje.....                                | 66 |
| Slika 41. Uzorci pripremljeni za makroanalizu.....  | 66 |
| Slika 42. Mjerenje geometrijskih veličina na uzorcima.....                                | 67 |
| Slika 43. Kidalica EU 40 mod.....   | 68 |
| Slika 44. Epruveta za statičko vlačni pokus.....  | 69 |
| Slika 45. Izgled epruvete nakon kidanja.....  | 70 |
| Slika 46. Dijagram sila-produljenje dobiven statičko vlačnim pokusom.....                 | 70 |
| Slika 47. Pripremljeni uzorci prije uranjanja u agresivnu otopinu FeCl <sub>3</sub> ..... | 71 |
| Slika 48. Uzorci uronjeni u agresivnu otopinu.....  | 72 |
| Slika 49. Izgled uzoraka nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj otopini.....                | 73 |
| Slika 50. Mjerenje kemijskog sastava uređajem Olympus InnovX.....                         | 74 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima [6].....             | 8  |
| Tablica 2. Kemijski sastav standardnih vrsta austenitnih nehrđajućih čelika [6].....              | 8  |
| Tablica 3. Utjecaj pojedinih elemenata u austenitnim Cr-Ni čelicima [7].....                      | 8  |
| Tablica 4. Mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika na sobnoj temperaturi [6]..... | 10 |
| Tablica 5. Klasifikacija austenitnih čelika prema normama [9].....                                | 10 |
| Tablica 6. Orijentacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika [22].....                  | 24 |
| Tablica 7. Primjeri k koeficijenata za različite vrste elektroda [23].....                        | 26 |
| Tablica 8. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [24].....           | 27 |
| Tablica 9. Karakteristike izvora zavarivanja „TransTig 1750 Puls / Set“ [28].....                 | 33 |
| Tablica 10. Klasifikacija elektroda [30].....   | 36 |
| Tablica 11. Mehanička svojstva čelika AISI 304 [44].....  | 53 |
| Tablica 12. Kemijski sastav osnovnog materijala iskazan u masenim udjelima [44].....              | 53 |
| Tablica 13. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje MagicWave 2200 Job [45].....           | 55 |
| Tablica 14. Prikaza primjenjenih parametara kod zavarivanja uzoraka.....                          | 56 |
| Tablica 15. Kemijski sastav metala zavara uzoraka prije i nakon nagrizanja.....                   | 74 |

**POPIS KRATICA I OZNAKA**

|            |  |
|------------|--|
| AISI       | American Iron and Steel Institute          |
| ZUT        | Zona utjecaja topline                      |
| BCC        | Body centered cubic                        |
| PREN       | Pitting resistance equivalent number       |
| TIG        | Tungsten inert gas                         |
| GTAW       | Gas tungsten arc welding                   |
| WIG        | Wolfram inert gas                          |
| HRN EN     | Hrvatske norme                             |
| W. Nr      | Werkstoffnummer                            |
| AOD        | Argon oxygen decarburization               |
| I          | jakost struje                              |
| U          | napon                                      |
| Q          | unos topline                               |
| $R_{p0,2}$ | granica razvlačenja                        |
| $R_m$      | vlačna čvrstoća                            |
| $v_z$      | brzina zavarivanja                         |
| w          | maseni udio                                |
| DM         | dodatni materijal                          |
| OM         | osnovni materijal                          |
| ZT         | zona taljenja                              |
| TKPN       | toplinski koeficijent površinske napetosti |

## SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada jest utvrditi utjecaj aktivacijskog premaza na mehanička i korozijska svojstva zavarenog spoja od nehrđajućeg visokolegiranog austenitnog čelika bez primjene dodatnog materijala. Za postupak zavarivanja odabran je TIG. U teorijskom dijelu rada opisani su i uspoređeni konvencionalan TIG i A-TIG postupak zavarivanja nehrđajućih visokolegiranih austenitnih čelika. Također su analizirani mehanizmi koji dovode do povećane penetracije kod primjene aktivacijskog premaza te je opisan i sam sastav takvih premaza. Na kraju je dan pregled postojećih primjera tehnologije zavarivanja uz primjenu aktivacijskih premaza.

U eksperimentalnom dijelu zavareni su uzorci od nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 304 s oba navedena TIG postupka, te su ispitivana i uspoređena mehanička i korozijska svojstva kod oba uzorka. Posebno je istražena mogućnost primjene aktivacijskog premaza kod zaštite korijena umjesto plina. Analizom rezultata ocijenjena je podobnost primjene aktivacijskog premaza obzirom na postignuta mehanička i korozijska svojstva.

Ključne riječi: TIG, aktivacijski premaz, AISI 304

## SUMMARY

The aim of this graduation thesis is to determine the effect of the activation flux on the mechanical and corrosion properties of welded joints of stainless high-alloyed austenitic steel without the use of filler material. For the welding TIG process was selected. In the theoretical part description and comparison of conventional TIG and A-TIG welding of stainless high-alloyed austenitic steels is made. Also, mechanisms that lead to increased penetration by application of the activation flux are analyzed and described the composition of this flux. At the end of theoretical part a review of existing examples of welding technology with the use of the activation flux is given.

In the experimental part the samples of austenitic stainless steel AISI 304 are welded with both of these TIG welding procedures, and the mechanical and corrosion properties are examined and compared. Particularly the possibility of applying the activation flux for the weld root protection instead of shielding gas is studied. By analyzing the results, suitability of the activation flux application was assessed due to achieved mechanical and corrosion properties.

Key words: TIG, activation flux, AISI 304

## 1. UVOD

Nehrđajući ili korozijski postojani čelici su važan dio metalnih materijala koji nalaze svoju širu primjenu u raznim industrijskim područjima, medicini, arhitekturi, a jedno od značajnijih područja njihove primjene jest i izrada različitih zavarenih konstrukcija izloženih morskom okolišu, npr. u brodogradnji, off shore tehnici i slično. Nehrđajući čelik zbog svog kemijskog sastava ima povećanu otpornost na koroziju, što mu je glavna karakteristika i po čemu je uostalom i dobio ime. Kod takvih materijala potrebno je voditi računa o tome kako imaju slabu otpornost na koroziju u okruženjima, odnosno okolišima sa slabom ili nikakvom cirkulacijom kisika.

Zavarivanje je važan postupak za proizvodnju i montažu konstrukcija od nehrđajućeg čelika. Nehrđajući čelici su materijali s dobrom zavarljivošću, ali potrebno je obratiti pozornost, odnosno ispoštovati određena pravila da bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta spoja bez grešaka. Iako se ovi materijali zavaruju bez značajnijih poteškoća ukoliko se uvažavaju njihove specifičnosti poput izražene sklonosti deformacijama, kao posljedica unosa topline tijekom zavarivanja može doći do znatnog smanjenja svojstava korozijske otpornosti što u okolišu kakav je more i morska atmosfera može dovesti do intenzivnih lokalnih korozijskih oštećenja u područjima zavarenih spojeva.

Glavni postupak za zavarivanje nehrđajućih čelika jest TIG, koji daje dobra svojstva zavarenog spoja. Najveći nedostaci ovog postupka su dugo vrijeme zavarivanja te slabo protaljivanje. Upravo zbog tih mana teži se unapređenju procesa i to primjenom aktivacijskog premaza kojem je prvenstvena svrha povećanje penetracije i zavarivanje u što manje prolaza čime se bitno skraćuje vrijeme zavarivanja, odnosno povećava efikasnost zavarivanja.

## 2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

### 2.1. Općenito

Nehrđajući čelik (eng. stainless steel) naziv je koji se koristi još od najranijih faza razvoja ovih čelika (početak XX. stoljeća). Danas označava široki raspon različitih vrsta i kvaliteta čelika otpornih na koroziju. Nehrđajući čelik, korozijski postojani čelik, inox i prokrom su sinonimi za slitinu čelika s minimalnim udjelom kroma od 10,5 %. Uz dodatak ostalih legirajućih elemenata poput nikla, dušika, molibdena, titana kojima se bilo modificira njihova struktura, ili postižu svojstva veće korozijske postojanosti, poboljšava obradivost, čvrstoća ili pak žilavost na sniženim temperaturama.

1913. godine engleski metalurg Harry Brearly je radeći na projektu poboljšavanja učinka cijevi pušaka, slučajno otkrio kako dodavanjem kroma niskougljičnom čeliku dolazi do otpornosti na oštećenja, odnosno na koroziju. Nakon tog otkrića, Brearly se okrenuo proizvodnji pribora za jelo. Sljedeće godine, njemačka firma Krupp je počela s eksperimentima, te je u navedenu slitinu dodala i nikal, te je njihov nehrđajući čelik imao još jednu prednost, a to je da je bio mekši i lakši za obrađivanje. Uz ugljik i krom, moderni nehrđajući čelik može također u sebi sadržavati i nikl, molibden i titan. Ipak, glavni element svakog nehrđajućeg čelika je krom, koji mu daje otpornost od hrđanja. Krom se u čeliku spaja s kisikom iz atmosfere i formira tanak, nevidljivi sloj nazvan “pasivni film” [1].

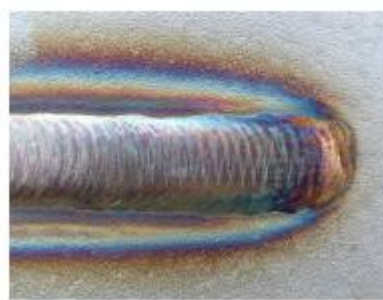
Nehrđajući čelici svoja svojstva visoke korozijske postojanosti duguju prisutnosti pasivnog oksidnog filma bogatog kromom na njihovoj površini koji nastaje spontano, prirodnim procesima oksidacije u sredinama – medijima koji sadrže dovoljno kisika. Iako izuzetno tanak, približno 1-5 nanometara ( $1-5 \times 10^{-9}$  m) i oku nevidljiv, ovaj zaštitni film čvrsto prijanja i kemijski je stabilan u uvjetima koji osiguravaju dovoljnu količinu kisika na površini. Dodatno, obzirom na prirodu i spontano formiranje, zaštitni oksidni film, ima i važno svojstvo samoobnavljanja – čak i kada se, npr. u postupcima mehaničke strojne obrade, ukloni s površine, u sredinama s dovoljno kisika, gotovo trenutno, sam će se obnoviti (slika 1.).



Slika 1. Prikaz mehanizma samoobnavljanja pasivnog filma kromovih oksida na površini [2]

Ipak, nehrđajući čelici ne mogu se smatrati „neuništivima“. Pasivno stanje koje jamči korozijsku otpornost, može se, pod određenim uvjetima, razoriti, što ima za posljedicu pojavu korozijskih procesa, najčešće u obliku usko lokaliziranih korozijskih fenomena. Posebno je važno naglasiti da zavareni spojevi od nehrđajućih čelika mogu na konstrukciji predstavljati vrlo ozbiljnu opasnost zbog mogućih korozijskih oštećenja izazvanih najčešće rupičastom korozijom, ali i ostalim lokalnim korozijskim fenomenima poput korozije u procjepu, napetosne korozije, mikrobiološke korozije, interkristalne korozije, itd.

Bitan je i pažljiv odabir odgovarajuće vrste nehrđajućeg čelika za pojedinu specifičnu namjenu, tj. sredinu i eksploatacijske uvjete kojima će konstrukcija biti izložena, vrlo je važno korektno i tehnološki ispravno provođenje tehnologije zavarivanja (postupak, parametri, dodatni materijali, tehnološka disciplina itd.). Naime, zavareni spojevi na konstrukcijama od nehrđajućih čelika, lokaliteti su izraženih strukturnih i površinskih nehomogenosti i kao takvi predstavljaju „idealno“ mjesto za pokretanje korozijskih procesa kao što su pogrubljenja zrna i obojenja površine nastala zavarivanjem (slika 2.).



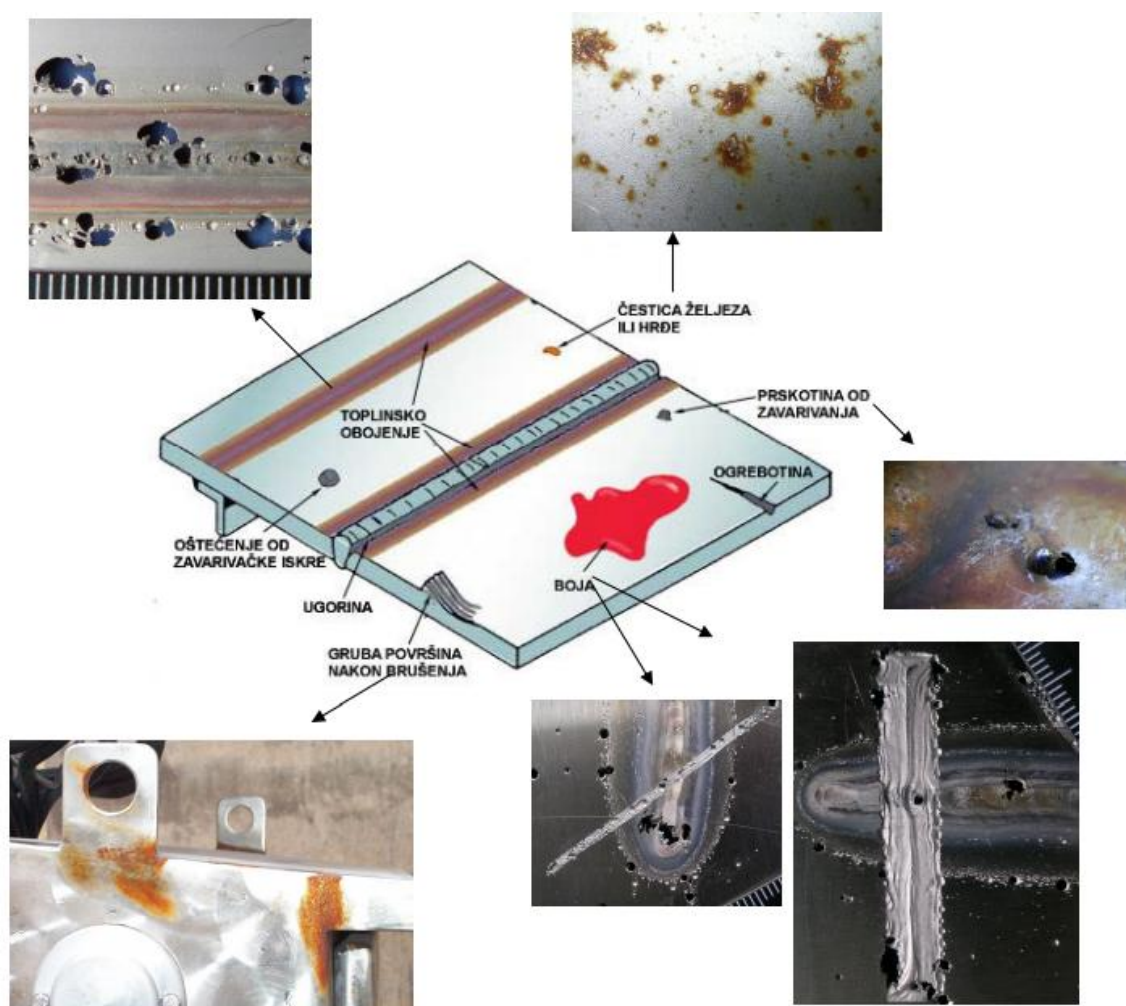
a) Razlike u strukturi (lijevo – osnovni metal, desno – metal zavara

b) Obojenja površine nastala unosom topline zavarivanjem

Slika 2. Prikaz osnovnih strukturnih i površinskih nehomogenosti [2]



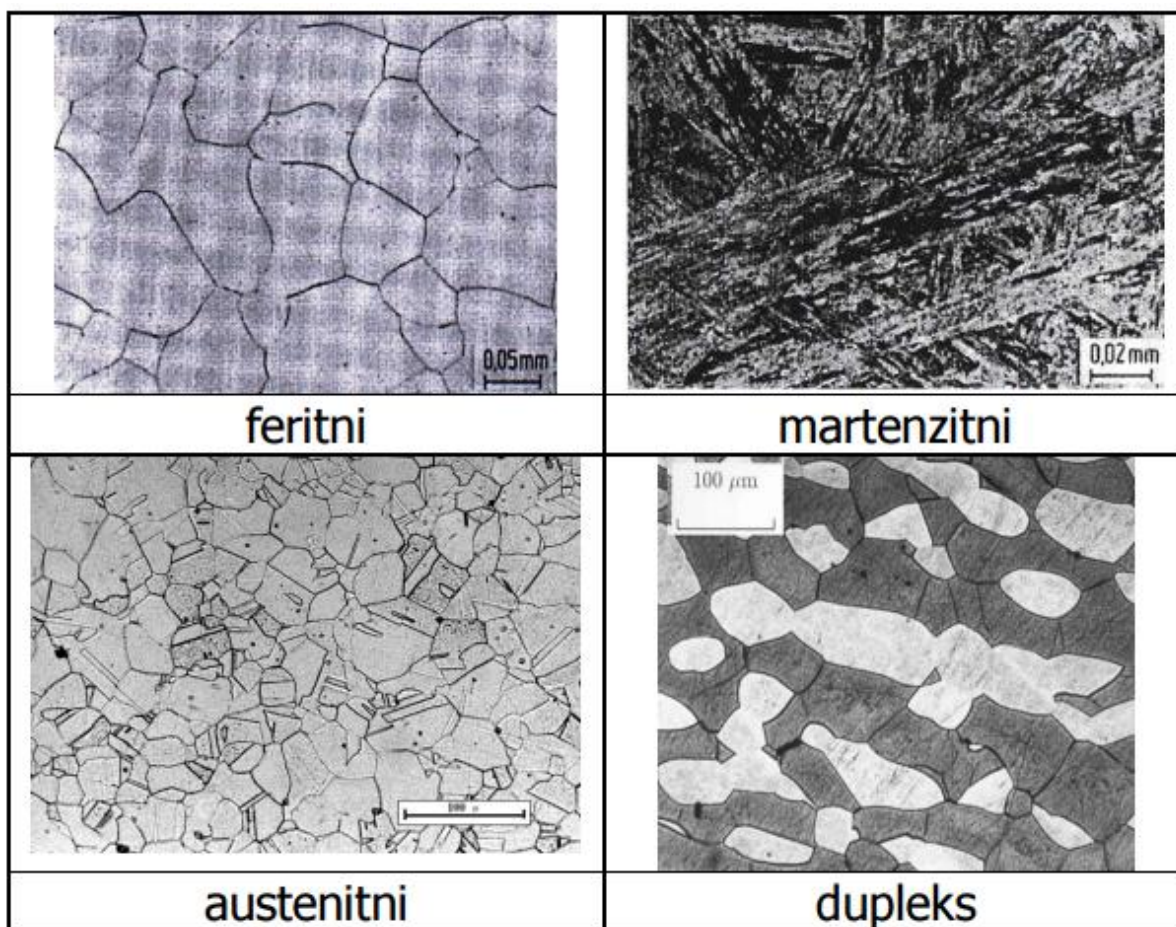
Dodatno, različiti drugi površinski poremećaji, nastali na primjer prilikom rukovanja, izrade, montaže ili korištenja konstrukcija izrađenih od nehrđajućih čelika, mogu jednako tako nepovoljno djelovati na sposobnost postizanja i održavanja pasivnog stanja. Slikom 3. prikazane su glavne karakteristične posljedice – korozijska oštećenja, nastala uslijed različitih nehomogenosti površine, bilo da se radi o neuklonjenim obojenjima izazvanim unosom topline tijekom zavarivanja, kontaminacijom česticama željeza, nastrcanim metalnim kapljicama ili neprimjereno gruboj mehaničkoj obradi ili neuklonjenim organskim bojama, markerima ili samoljepljivim folijama [2].



Slika 3. Prikaz posljedica prisutnosti pojedinih karakterističnih nehomogenosti površine [2]

## 2.2. Podjela nehrđajućih čelika

U današnje vrijeme poznate su četiri osnovne skupine – vrste nehrđajućih čelika, pri čemu je podjela izvršena na osnovi njihovih mikrostrukturnih obilježja. Tako postoje martenzitni, feritni, austenitni i dupleks (austenitno – feritni) nehrđajući čelici (slika 4.). Dodatno, navedena podjela može se proširiti ako se uzme u obzir i mogućnost očvršćavanja, pa tako postoji i peta skupina nehrđajućih čelika - tzv. precipitacijski očvrstivi čelici [2].



Slika 4. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [2]

### Feritni nehrđajući čelici

Legure iz ove skupine sadrže uobičajeno 11-17 % Cr, uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata (npr. Mo, Si, Al, Ti ili Nb). Sumpor i selen mogu se dodati kako bi se poboljšala strojna obradivost, a udio austenitizirajućih elemenata (C, N i Ni) vrlo je mali. Feritni nehrđajući čelici su feromagnetični i ne mogu očvrstnuti postupcima toplinske obrade jer

nemaju faznu pretvorbu. Njihove granice razvlačenja kreću se od 275-350 N/mm<sup>2</sup>, vlačna čvrstoća 415-585 N/mm<sup>2</sup>, a duktilnost 20-35 %. Slaba čvrstoća i osjetljivost na senzibilizaciju ograničavaju njihovu obradljivost i upotrebu. Čvrstoća na povišenim temperaturama slabija je nego kod austenitnih čelika. Prednost ove skupine čelika je otpornost na koroziju i oksidaciju uz relativno nisku cijenu, pa se tako koriste npr. u uvjetima izloženosti dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi. Ugrađuju se u postrojenja u kojima je otvorena opasnost od pojave napetosne korozije, gdje ne mogu zadovoljiti austenitni čelici. Neki feritni nehrđajući čelici (kao što su vrste 409 i 405) koji se koriste, primjerice, u auspusima, ispušnim sustavima, kuhinjskim sudoperima imaju niže cijene od ostalih nehrđajućih čelika, dok su visokolegirani s manjim udjelima C i N (kao što su vrste 444 i 261) skuplji, ali imaju i visoku otpornost na kloride [1, 3] .

### **Martenzitni nehrđajući čelici**

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 11-13% Cr te do 1,2% ugljika, feromagnetični su i mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade. Kao i feritni, oni također imaju centriranu kubičnu kristalnu strukturu u očvrslom stanju. Male količine nikla dodaju se za poboljšanje korozijske otpornosti, a sumpor i selen za obradivost. Najveći nedostatak martenzitnih čelika je osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnim okolišima. Također imaju lošu otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura. No, zbog otpornosti na koroziju te visokog sadržaja ugljika koji osigurava otpornost na trošenje koriste se za izradu kotrljajućih elemenata kugličnih ležajeva, oštrica noževa, kirurškog i zubarskog alata, turbinskih lopatica i dijelova za rad na visokim temperaturama (npr. cijevi generatora pare). Za dobivanje korisnih svojstava i za eliminaciju pukotina, obično zahtijevaju predgrijavanje i toplinsku obradu nakon zavarivanja [1, 3].

### **Dupleks nehrđajući čelici**

Dupleks nehrđajući čelici počinju se primjenjivati od 1930. g. iako tek 1970-ih ulaze u masovnu upotrebu. Struktura im je dvofazna i sastoji se od otprilike 50 % ferita i 50 % austenita. Ovi čelici pokazali su povećanu otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida te imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Čvrstoća ovih čelika je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika. Danas se najčešće oznaka duplex upotrebljava za čelike koji sadrže 22% Cr, a superduplex za čelike sa sadržajem kroma 25% [1, 3].

### **Precipitacijski očvrstljivi nehrđajući čelici**

Precipitacijski očvrstljivi nehrđajući čelici su krom-nikal čelici, koji sadrže legirane dodatke kao što su aluminij, bakar ili titan, koji omogućuju očvrsnuće i starenje. Poboljšavaju svoju čvrstoću i tvrdoću kroz razne tretmane toplinske obrade. Dostupni su također kao valjani proizvodi s vrlo visokim omjerom čvrstoće i težine. Martenzitski precipitacijski očvrstljivi čelici se koriste u zrakoplovstvu, kemijskoj i petrokemijskoj industriji, prehrambenoj industriji. Precipitacijsko očvrstljivi nehrđajući čelici su podijeljeni u tri grupe: martenzitni, poluaustenitni i austenitni. Martenzitni (kao što je tip 630) i poluaustenitni (kao što je tip 631) mogu osigurati veću čvrstoću od austenitnih (kao što je tip 660) [3, 4].

### **Austenitni nehrđajući čelici**

Austenitni čelici zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava te estetskih karakteristika najčešće su korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta. Više o ovoj skupini čelika nalazi se u poglavlju 2.3. [5].

## **2.3. Sastav i svojstva austenitnih čelika**

Općeniti kemijski sastav austenitnih nehrđajućih čelika prikazan je u tablici 1., a u tablici 2. prikazan je kemijski sastav po vrstama austenitnih čelika. Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02 - 0,15% ugljika, 16 - 24% kroma, 8 - 20% nikla, uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titanija, niobija, tantala, dušika koji djeluju na proširenju austenitnog područja (tablica 3.). Glavna prednost ove skupine čelika je otpornost na interkristalnu koroziju, a glavni nedostatak austenitnih čelika predstavlja sniženje granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika. Zbog visokog udjela legiranih elemenata austenitni čelici su skuplji od martenzitnih nehrđajućih čelika i feritnih s nižim i srednjim sadržajem kroma [5].

Tablica 1. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima [6]

| Element        | Maseni udio, %     |
|----------------|--------------------|
| krom           | 16 do 26           |
| nikal          | 8 do 35            |
| mangan         | 1 do 2 (4 do 15,5) |
| silicij        | 0,5 do 3           |
| molibden       | do 2               |
| dušik          | do 0,15            |
| titan i niobij | do 0,2             |
| ugljik         | 0,02 do 0,08 (0,1) |

Tablica 2. Kemijski sastav standardnih vrsta austenitnih nehrđajućih čelika [6]

| Oznake            |        |        | Maseni udio elemenata, % |          |       |           |     |           |           |        |           |                 |
|-------------------|--------|--------|--------------------------|----------|-------|-----------|-----|-----------|-----------|--------|-----------|-----------------|
| EN oznaka         |        | USA    | C                        | Mn       | P     | S         | Si  | Cr        | Ni        | Mo     | N         | Ostatak         |
| X2CrMnNiN17-7-5   | 1.4371 | 201 L  | 0,03                     | 6-8      | 0,045 | 0,015     | 1   | 16-18     | 3,6-5,5   | -      | 0,15-0,2  | -               |
| X12CrMnNiN17-7-5  | 1.4372 | 201    | 0,15                     | 5,5-7,5  | 0,045 | 0,015     | 1   | 16-18     | 3,5-5,5   | -      | 0,05-0,25 | -               |
| X12CrMnNiN18-9-5  | 1.4373 | 202    | 0,15                     | 7,5-10,5 | 0,045 | 0,015     | 1   | 17-19     | 4-6       | -      | 0,5-0,25  | -               |
| X8CrMnCuNB17-8-3  | 1.4597 | 204C   | 0,1                      | 6,5-8,5  | 0,04  | 0,03      | 2   | 16-18     | 2         | 1      | 0,15-0,3  | -               |
| X8CrNiS18-9       | 1.4305 | 303    | 0,1                      | 2        | 0,045 | 0,15-0,35 | 1   | 17-19     | 8,0-10,0  | -      | 0,11      | Cu: 1           |
| X5CrNi18-10       | 1.4301 | 304    | 0,07                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 17,5-19,5 | 8-10,5    | -      | 0,11      | -               |
| X2CrNi18-11       | 1.4306 | 304L   | 0,03                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 18-20     | 10-12     | -      | 0,11      | -               |
| X6CrNi18-10       | 1.4948 | 304H   | 0,04-0,08                | 2        | 0,035 | 0,015     | 1   | 17-19     | 8-11      | -      | 0,1       | -               |
| X5CrNiMo17-12-2   | 1.4401 | 316    | 0,07                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 16,5-18,5 | 10-13     | 2-2,5  | 0,11      | -               |
| X2CrNiMo17-12-2   | 1.4404 | 316L   | 0,03                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 16,5-18,5 | 10-13     | 2-2,5  | 0,11      | -               |
| X6CrNiMoTi17-12-2 | 1.4571 | 316Ti  | 0,08                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 16,5-18,5 | 10-13     | 2-2,5- | -         | Ti: 0,7         |
| X6CrNiMoB17-12-2  | 1.4919 | 316H   | 0,04-0,08                | 2        | 0,035 | 0,015     | 1   | 16,5-18,5 | 10-13     | 2-2,5- | 0,11      | B: 0,0015-0,005 |
| X2CrNiMoN17-13-5  | 1.4439 | 317LMN | 0,03                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 16,5-18,5 | 12,5-14,5 | 4-5    | 0,12-0,22 | -               |
| X6CrNiTi18-10     | 1.4541 | 321    | 0,08                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 17-19     | 9-12      | -      | -         | Ti: 0,7         |
| X12NiCrSi35-16    | 1.4864 | 330    | 0,15                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1-2 | 15-17     | 33-37     | -      | 0,11      | -               |
| X6CrNiNb18-10     | 1.4550 | 347    | 0,08                     | 2        | 0,045 | 0,015     | 1   | 17-19     | 9-12      | -      | -         | Nb: 1           |

Tablica 3. Utjecaj pojedinih elemenata u austenitnim Cr-Ni čelicima [7]

| Element  | Tvori strukturu | Karakteristike  |
|----------|-----------------|---|
| C        | A (austenit)    | 30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> i uzrokovati interkristalnu koroziju - IKK.      |
| Cr       | F (ferit)       | Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji  |
| Ni       | A               | Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost Ni. (γ-gen).   |
| N        | A               | 30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću. Pomaže stvaranju ferita.  |
| Nb       |                 | Dodaje se čeliku min Nb ≥ 8 x % C da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.  |
| Mn       | A               | Spriječava vruće pukotine stvaranjem MnS. γ - gen.  |
| Mo       | F               | Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita (α - gen). |
| P, S, Se | -               | Olakšava obradu odvajanjem čestica. Pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.   |
| Si       | F               | Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji) Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije. Pomaže stvaranje ferita.                                      |
| Ti       | -               | Dodaje se čeliku Ti ≥ 5 x % C da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna. Pomaže stvaranje ferita.                                |

Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika:

- nemagnetični su,
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlična plastičnost, nisko naprezanje tečenja ( $185 - 225 \text{ N/mm}^2$ ),
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad  $600^\circ\text{C}$ ,
- visoka žilavost, oksidacijska i korozijska otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- postojana austenitna struktura od "solidus" temperature do ispod sobne temperature,
- kubično plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- visoka otpornost na rupičastu koroziju, napetosnu i interkristalnu, ali ta otpornost se može smanjiti u ZUT-u zbog visokih temperatura,
- dodavanjem Cr više od 18 % općenito se povećava otpornost prema koroziji,
- titan i nobij - niski sadržaj ugljika (do 0,03 %) što sprječava interkristalnu koroziju,
- kod austenitnih čelika koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50% veći s obzirom na ostale čelike, što utječe na pojavu deformacija i zaostalih napetosti tijekom i nakon zavarivanja,
- koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60 % manji što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja,
- za povećanje otpornosti prema napetosnoj i rupičastoj koroziji u leguru se dodaje molibden, dok nikal još dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji,
- specifični električni otpor je također povećan, a utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice i ostalo [5,8].

U tablici 4. navedena su mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika pri sobnoj temperaturi. Navedene vrijednosti odnose se na žareno stanje.



Tablica 4. Mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika na sobnoj temperaturi [6]

| Čelik           | Vlačna čvrstoća<br>N/mm <sup>2</sup> | Granica razvlačenja<br>N/mm <sup>2</sup> | Istezljivost<br>% | Suženje<br>% |
|-----------------|--------------------------------------|--|-------------------|--------------|
| X5CrNi18-10     | 515                                  | 205                                      | 40                | 50           |
| X2CrNi18-9      | 480                                  | 170                                      | 40                | 50           |
| X3CrNiMo17-13-3 | 515                                  | 205                                      | 40                | 50           |
| X2CrNiMo17-12-2 | 480                                  | 170                                      | 40                | 50           |
| X6CrNiTi18-10   | 515                                  | 205                                      | 40                | 50           |
| X6CrNiNb18-10   | 515                                  | 205                                      | 40                | 50           |

Vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja austenitnih nehrđajućih čelika prilično su skromne i slične su vrijednostima kod niskougličnih čelika. Minimalne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) nalaze se u rasponu od 205 do 275 N/mm<sup>2</sup>, a vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) između 520 i 760 N/mm<sup>2</sup>. Istezljivost je u rasponu od 40 do 60 %. Vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja mogu se povisiti hladnom deformacijom. Austenitni čelici općenito ne mogu očvrnuti precipitacijom niti strukturnom transformacijom, osim nekih vrsta s visokim udjelom nikla i dodatkom titana.

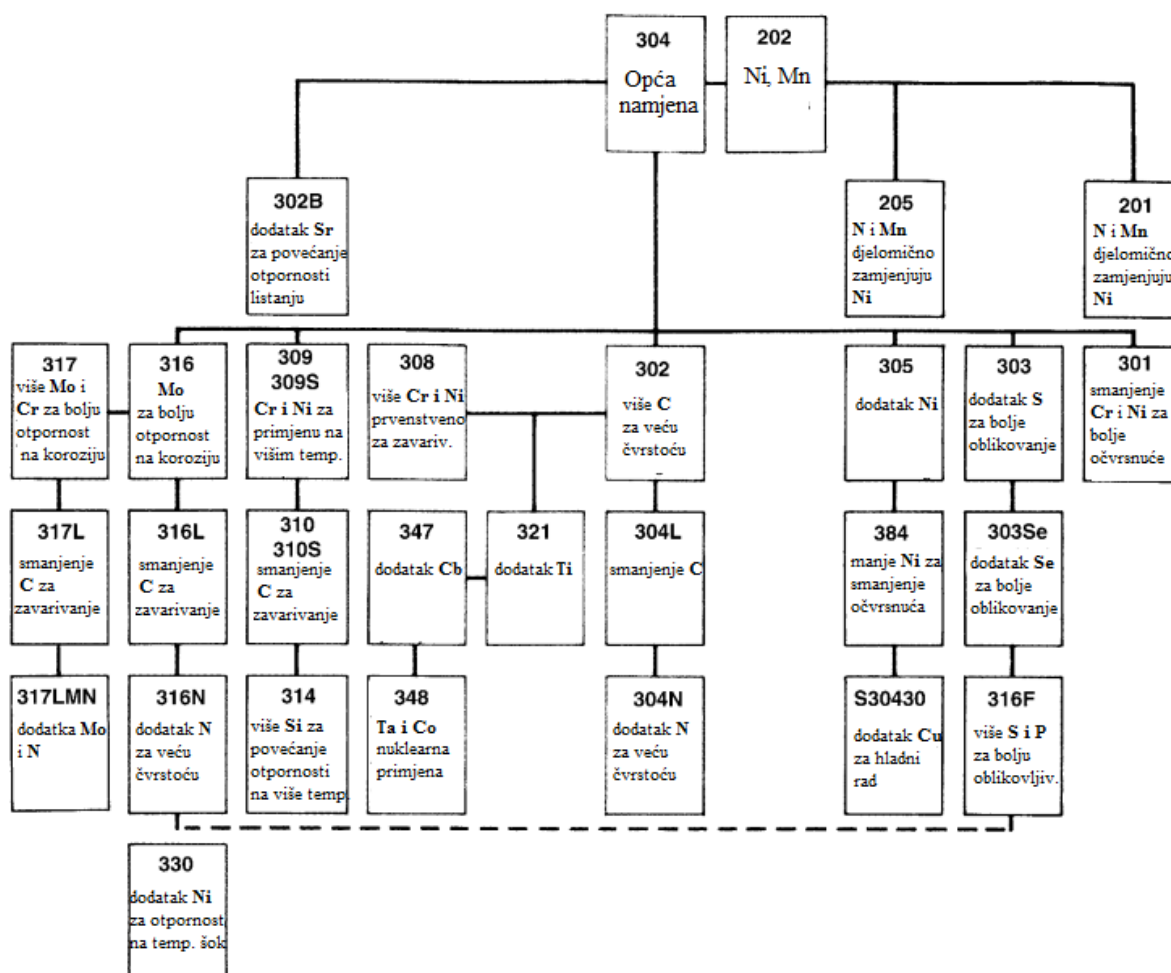
## 2.4. Klasifikacija, podjela i primjena austenitnih čelika

U tablici 5 prikazana je klasifikacija austenitnih čelika prema normama: EN, AISI, i W.Nr..

Tablica 5. Klasifikacija austenitnih čelika prema normama [9]

| EN                | AISI (USA) | W.Nr. (Njemačka) |
|-------------------|------------|------------------|
| X10CrNi18-8       | 301        | 1.4310           |
| X5CrNi18-10       | 304        | 1.4301           |
| X2CrNi18-10       | 304L       | 1.4306           |
| X6CrNiTi18-10     | 321        | 1.4541           |
| X6CrNiMoTi17-12-2 | 316Ti      | 1.4571           |
| X15CrNiSi25-21    | 314        | 1.4841           |
| X6Cr17            | 430        | 1.4016           |
| X30Cr13           | 420        | 1.4028           |
| X46Cr13           | 420        | 1.4034           |

Austenitni nehrđajući čelici primjenjuju se u metalurškoj, prehrambenoj, kemijskoj, farmaceutskoj i građevinskoj industriji, za izradu kućanskih aparata, za izradu ugostiteljske opreme, za proizvodnju kirurških i medicinskih instrumenata. Njihovu upotrebu donekle otežava mogućnost pojave senzibilizacije prilikom postupka zavarivanja što može imati za posljedicu pojavu interkristalne korozije, fenomena koji se na zavarenim konstrukcijama javljao često u početnom razdoblju korištenja ovih materijala i ograničavao njegovu širu primjenu. Senzibilizacija se može izbjeći odabirom stabiliziranih čelika niskog sadržaja ugljika. Podjela i osnovne značajke (legirni elementi) austenitnih čelika prikazana je na slici 5.



Slika 5. Podjela i značajke austenitnih čelika [10]



Osnovne vrste i primjene austenitnih čelika prema [1,11,12] :

### **AISI 304**

AISI 304 je austenitni 18/10 Cr-Ni i on je predstavnik austenitnih čelika jer pokriva 70% uporabe i proizvodnje od svih austenitnih čelika. Otporan je na kiseline, zbog niskog udjela ugljika otporan je i na interkristalnu koroziju nakon zavarivanja kod debljine limova do 6mm i to bez naknadne toplinske obrade. Dopusćen je za primjene do temperature do 300°C. Zavarljivost je dobra svim elektrolučnim postupcima. Ima vrlo dobru podobnost poliranja i dobru sposobnost preoblikovanja dubokim vučenjem i valjanjem itd. Prilikom rezanja, potrebno je zbog tendencije ka hladnom očvrnuću primjeniti oštro brušene alate iz brzoreznog čelika ili iz tvrdog metala.

**Primjena:** otporan je na vodu, vodenu paru, vlažnost zraka, konzumne kiseline kao i na slabe organske i anorganske kiseline. Ima mnogostrane mogućnosti primjene npr. u prehrambenoj industriji, proizvodnji ugostiteljske opreme, proizvodnji pića, mljekarstvu, pivovarama i podrumarstvu, farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji, izradi kemijskih aparata, arhitekturi, automobilske industriji, za kućanske predmete i aparate, sanitarne uređaje itd. Čelični limovi AISI 304 imaju najširu primjenu od svih ostalih limova iz austenitne skupine nehrđajućih čelika. Kao hladno valjani do debljine 6 mm, glatke mat površine, koriste se u primjeni od najjednostavnijih konstrukcija do onih zahtjevnijih, u izradi kotlova, kao noseća konstrukcija. Također se primjenjuju i u kontinentalnim uvjetima gdje ne postoji doticaj s agresivnim medijima, kiselinama i solima, kao na primjer u prehrambenoj industriji i kod izrade onih proizvoda koji ne zahtijevaju posebnu površinsku obradu.

### **AISI 316Ti**

AISI 316Ti je austenitni 18/12/2 Cr-Ni-Mo čelik, otporan na kiseline, stabiliziran titanom. Dopusćen je za temperature do 400°C. Uslijed dodatka molibdena, pokazuje veću otpornost na kiseline. Zbog stabiliziranja s titanom nije potrebna toplinska obrada nakon zavarivanja većih debljina. Zavarljivost je dobra svim elektrolučnim postupcima. Plinsko zavarivanje se ne smije primjenjivati. Kod ovog čelika poliranjem se ne može postići visoki sjaj zbog dodatka titana. Oblikovanje dubokim vučenjem, valjanjem itd. je dobro. Kod rezanja je zbog tendencije ka hladnom očvrnuću kao i kod AISI 304 potrebno primjenjivati oštro brušene alate iz brzoreznog čelika ili iz tvrdog metala.

**Primjena:** prikladan je za izradu dijelova konstrukcija, uređaja i aparata za kemijsku industriju, posebno pri uporabi medija sa sadržajem halogena i neoksidirajućih kiselina, gdje kvaliteta bez molibdena više nije dovoljna. Viša granica razvlačenja je prednost kod konstrukcija i elemenata s višim mehaničkim zahtjevima. Područja primjene su industrija celuloze, tekstila, gnojiva, umjetnih materijala i goriva, foto-industrija i farmaceutska industrija.

### **AISI 316L**

AISI 316 L je austenitni, Cr-Ni čelik, legiran s (Mo), ima vrlo niski sadržaj ugljika i relativno je dobro otporan na koroziju, naročito na interkristalnu. Polira se na visoki sjaj. Dopušten je za temperature do 400 °C. Naziva se još i „morski inox“.

**Primjena:** čelik se upotrebljava za namjene skoro iste kao i čelik u kvaliteti AISI 316 Ti, znači široka primjena u kemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji. Od njega se rade cijela, kompletna oprema za postrojenja, primjerice u mljekarstvu, proizvodnji voćnih sokova, likera itd.

### **AISI 321**

AISI 321 je austenitni, 18/10 Cr-Ni čelik, otporan na kiseline, koji je stabiliziran dodatkom titana. Zbog toga je nakon zavarivanja i kod većih debljina interkristalno postojan bez naknadne kemijske obrade. Za tlačne posude, navedeni austenitni čelik je dozvoljen za radne temperature do 400°C. Zavarljivost je dobra kod svih elektrolučnih postupaka. Plinsko zavarivanje se ne smije primjenjivati. Zbog dodataka titana čelik se ne može polirati do visokog sjaja. Moguće je oblikovanje dubokim vučenjem, obrezivanjem oštih rubova, valjanje je također dobro.

**Primjena:** kemijska otpornost je ista kao i kod W.Nr. 1.4301, pa je i primjena slična, osim ako se ne traži površina visokog sjaja. Posebno je prikladan za konstrukcije s debljinom lima iznad 6 mm, koji se nakon zavarivanja ne moraju toplinski obrađivati.

Što se tiče primjene u metalnoj i građevnoj industriji austenitni čelici se primjenjuju za izradu rebrastih, perforiranih i dekor limova, raznih šipaka, profila, cijevi (okrugle, kvadratne), spojnice s unutarnjim navojima, razne pribornice... Na slici 8. Prikazane su spojnice i pribornice od austenitnog nehrđajućeg čelika.



Slika 6. Proizvodi izrađeni od austenitnog čelika [12]

## 2.5. Zavarljivost austenitnih čelika

Austenitni čelici dobro su zavarljivi (uz iznimku čelika koji sadrže sumpor ili selen-čelici za strojnu obradu). Ne treba ih predgrijavati prije zavarivanja. Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 – 850 °C što može dovesti do pojave interkristalne korozije. Zavarljivost ovih konstrukcijskih materijala traži odgovarajuću tehnološku razinu i disciplinu, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Naime, visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću ka deformacijama kao posljedica zavarivanja. Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavora, što se javlja s jedne strane kao posljedica nečistoća u materijalu, te uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je danas uglavnom riješen pravilnim odabirom dodatnih materijala (4-12% delta ferita) te samom tehnikom kao i ostalim uvjetima zavarivanja. Austenitni korozijski postojani čelici smatraju se lakše zavarljivim od ostalih skupina korozijski postojanih Cr-Ni čelika iz razloga što kod njih ne nastupaju velike fazne (metalurške) transformacije. Zbog toga je moguće postići zavarene spojeve sa svojstvima sličnima osnovnom materijalu i bez prethodnog zagrijavanja ili naknadne toplinske obrade [2].

## 2.6. Problemi zavarljivosti austenitnih čelika

Opći zahtjevi koji su preporučeni za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja austenitnih čelika su [8]:

- izbor dodatnog materijala koji osigurava sadržaj  $\delta$  – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- električni luk držati što kraćim,
- bitna je vrsta i čistoća zaštitnih plinova te omjer mješanja istih,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavati, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100 °C do 150 °C,
- međuprolazna temperatura treba biti najviše do 100 °C,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- posebnu pozornost obratiti na naprave za stezanja i redoslijed zavarivanja zbog jakih deformacija,
- ne smije se ravnati s plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić i četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika.

Nepoštivanjem određenih zahtjeva tehnologije zavarivanja, a i zbog samih svojstava austenitnih čelika, javljaju se sljedeći problemi zavarljivosti [7, 13]:

### **1. Izlučivanje Cr karbida u temperaturnom području od 450 do 850 °C na granicama zrna**

Najizraženije izlučivanje Cr karbida dešava se pri oko 650 °C ) na granicama zrna. Izlučeni karbidi sprečavaju dislokaciju atoma na pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke, što smanjuje istezljivost i žilavost austenitne strukture. Ako je prisutan agresivan medij u eksploataciji, tada će uz granice zrna doći do **interkristalne korozije**, jer nema dovoljno Cr (manje od 12 %), koji je migrirao na granicu zrna tvoreći  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  s 94,3 % Cr.

Izlučivanje karbida odnosno interkristalna korozija može se spriječiti:

a) **Legiranjem elementima karbidotvorcima Nb, Ti, Ta**, koji tvore stabilne karbide. Ovi elementi imaju veći afinitet prema ugljiku od Cr, pa će se oni prvo vezati za ugljik, a Cr će ostati jednoliko raspoređen. Stabilizirajući elementi se dodaju prema sadržaju ugljika:

$$\frac{\text{Ti}}{\text{C}} \geq 5, \quad \frac{\text{Nb}}{\text{C}} \geq 8, \quad \frac{\text{Ta}}{\text{C}} \geq 16, \quad \text{ili} \quad \frac{\text{Ta} + \text{Nb}}{\text{C}} \geq 8 \quad (1)$$

Stabilizatori se dodaju u onovni ili dodatni materijal. Nb izgara jače u električnom luku, pa se za dodatni materijal koristi Ti umjesto Nb.

**b) Smanjenje sadržaja ugljika  $C < 0.03$**  - stvoreni karbidi su u malim količinama, u diskontinuiranim izlučinama, pa je nepovoljno djelovanje jako smanjeno. Nije moguća korozija po čitavom presjeku.

**c) Gašenjem** - toplinskom obradom na 1050 - 1100 °C kada se karbidi rastvore, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850 - 450 °C se zadržava struktura austenita bez izlučenog Cr na granicama zrna vezanog u kromov karbid.

**d) Malim unosom topline.**

Zavarivati treba u što hladnijem stanju, što se postiže sljedećim mjerama:

- ne predgrijavati
- temperatura između prolaza treba biti što niža, napr 100 °C maksimalno
- toplinski unos treba biti što niži

Ove mjere skraćuju vrijeme zadržavanja u intervalu 850-450 °C pri hlađenju, kada se mogu izlučivati Cr karbidi. Za pospješeno hlađenje preporuča se ponekad umetanje predmeta koji se zavaruju, u vodu ili dodatno hlađenje zavarenih spojeva vodom. Napr. hlađenje vlažnim krpama ili vlažnim četkama. Svi ovi zahtjevi mogu biti ublaženi ili ih se ne treba pridržavati ako je čelik stabiliziran s Ti, Nb ili Ta ili ima nizak sadržaj ugljika ( $< 0,03\%C$ ).

## **2. Izlučivanje krhkih Sigma faza ( $FeCr$ ) i hi faza $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{12}$**

Pored karbida i nitrida mogu se u nerđajućim čelicima izlučivati i intermetalne faze, koje imaju drugačiju strukturu, te smanjuju istezljivost i otpornost na koroziju.

**Sigma faza** su spojevi metala i ima ih oko 50 vrsta od kojih je najpoznatija  $FeCr$  s oko 48% Cr. Veoma je tvrda i krhka ( $HV = 1000 HV$ ). Veći sadržaj Cr (naročito  $> 20\%$ ), daje veću vjerojatnost pojave  $\sigma$  faze. Također i pri hlađenju zavarenog spoja može doći do pojave  $\sigma$  faze.

Vjerojatnije se pojavljuje  $\sigma$  faza pri zagrijavanju dužem od 20 h u području 600-830 °C i to iz feritne faze, no može nastati i iz čistog austenita.

Pri hlađenju se  $\sigma$  faza izlučuje ispod 830 °C. Kod nerđajućih čelika izlučuje se  $\sigma$  faza u pravilu kada je sadržaj **Cr veći od 16%**. Toplinskom obradom  $\sigma$  faza na 1200 °C prelazi u austenit ili ferit, no na visokoj temperaturi može se očekivati pogrubljenje zrna i smanjenje krhkosti.

Pored  $\sigma$  faze javlja se intermetalni spoj  $\chi$  (**hi**) **faza** ( $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{12}$ ). Prema Falkhard-u istraživao je utjecaj ostalih elemenata na izlučivanje  $\sigma$  i  $\chi$  faza koje povećavaju krhkost i dan je utjecaj preko krom ekvivalenta(Cre):

$$\text{Cre} = \text{Cr} + 0,31\text{Mn} + 1,76\text{Mo} + 1,7\text{Nb} + 1,58\text{Si} + 2,44\text{Ti} + 1,22\text{Ta} + 2,02 \quad (2) \\ + 0,97\text{W} - 2,66\text{Ni} - 0,177\text{Co}$$

Veći sadržaj Cr daje veću sklonost stvaranju krhkih faza. Uočava se da neki elementi djeluju na izlučivanje krhkih faza čak jače od Cr, a jedino Ni i Co djeluju usporavajuće na izlučivanje krhkih faza.

Kod stabiliziranih čelika je usporavajući utjecaj C na stvaranje intermetalnih spojeva smanjen. Stoga su stabilizirani čelici skloniji povećanju krhkosti. Slično je i s čelicima koji sadrže mal udio ugljika ( $< 0,03\%$  C).

Visok sadržaj Cr, vrlo nizak sadržaj ugljika ili stabilizirani čelik, te visok sadržaj  $\delta$  ferita pojačavaju izlučivanje  $\sigma$  faze. Sadržaj dušika djeluje slično kao i ugljik.

**3. Noževa korozija** (engl. knife line corrosion) stabiliziranih čelika nakon zagrijavanja u području 500-700 °C (napr. pri toplinskoj obradi).

Kod zavarivanja stabiliziranih Ti i Nb čelika u ZUT, napr. kod zavarivanja u više prolaza, dolazi do ponovnog otapanja ugljika u krutini, koji je bio vezan s Ti i Nb u karbide. Do korozije će doći samo ponovnim zagrijavanjem na 500-700 °C. Korozijski napad se javlja u uskom području ZUT, koje je bilo zagrijano iznad 1300 °C. U toj uskoj zoni se raspada Nb ili Ti karbid. Pri brzom hlađenju (brzom prolasku kroz područje 450-850 ili uže 500-700 ili još uže 550-650 °C) samo će se možda mali dio karbida NbC ili TiC ponovo stvoriti, a ostatak Nb, Ti i C ostaje otopljen u krutini. Ponovnim zagrijavanjem 500-700 °C zone koja je prethodno bila zagrijana na 1300 °C izlučivat će se  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  kromom bogati karbid, koji će uzrokovati **interkristalnu koroziju** u obliku linije - uske zone, pa se zato naziva "noževa korozija", koja ima oblik oštne linije nastale rezom noža.

Pojava interkristalne noževe korozije je moguća samo na Nb ili Ti stabiliziranim čelicima.

**Izbjeći** se može, smanjivanjem  $\text{C} < 0,04\%$  uz istovremeno stabiliziranje više nego je stehiometrijski potrebno ( $\text{Ti} = 8 \times \text{C}$ ,  $\text{Nb} = 15 \times \text{C}$ ). Ako je DM otporan na noževu koroziju, a OM nije, može doći do noževe korozije u ZUT-u na osnovnom materijalu.

#### **4. Vruće pukotine**

Preporuča se upotreba takvih austenitnih dodatnih materijala, koji daju depozit s 3 - 12% delta ferita, čime se postiže veća otpornost prema vrućim pukotinama. **Potpuno austenitna struktura depozita je sklonija pojavi vrućih pukotina.**

Vrste vrućih pukotina:

**a) Kristalizacijske pukotine u ZT** (engl. solidification cracks) koji nastaju pri skrućivanju ZT kada je između dendritnih kristala još prisutna rastaljena faza.

**b) Vruće pukotine ZUT:** u OM ili u ZT kod zavarivanja u više prolaza (engl. liquation cracks, micro cracks). Glavni razlog pojave kristalizacijskih pukotina je prisustvo filma niskotaljivih faza na granicama kristala pri primarnoj kristalizaciji. Kod stezanja pri hlađenju javljaju se na granici kristala mikropukotine u unutrašnjosti prolaza, koji se pri daljem hlađenju obično šire i izlaze na površinu kao makro pukotine.

**5. Pukotine zbog korozije uz naprezanje** se mogu javiti u eksploataciji, ako su prisutni agresivni mediji. Za austenitne čelike su kloridi najopasniji, pa treba držati sadržaj Cl što niže.

**6. Osjetljivost na prisutnost sumpora** - sumporni spojevi ili sumporna atmosfera (u peći) pri visokim temperaturama (npr. ZUT) može uzrokovati stvaranje nikl sulfida  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ , eutektika koja uzrokuje vruće pukotine. Treba čistiti površine prije zavarivanja ili toplinske obrade.

**7. Uključci volframa kod TIG zavarivanja** - uzrokovani su lošom tehnikom rada operatera (nepažnjom zavarivača došlo je do dodira zagrijane elektrode s DM ili talinom), pa se zavar kontaminirao volframom. Treba izbjegavati prevelika opterećenja elektrode jakom strujom. Obzirom na zavarljivost, zavarivanje je moguće svim važnijim postupcima. Dodatni materijali se izabiru tako da po sastavu odgovaraju OM.

**Čišćenje površine** je važno za kvalitetu zavarenog spoja i provodi se:

- Četke (obične ili rotirajuće) od nerđajućeg austenitnog čelika.
- Pjeskarenje s čistim pijeskom. Ne treba koristiti isti pijesak kojim je čišćen nelegirani čelik, jer sadrži čestice ovog čelika.
- Pri obradi odvajanjem čestica ili brušenjem alat ne mora biti od nerđajućeg austenitnog čelika. Sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor.
- Kemijsko čišćenje - nagrizanje u 10-20%  $\text{HNO}_3$ , a posebno nakon toplinskih operacija. Odmašćivanje OM i DM prije zavarivanja je neophodno kao i odstranjivanje čestica i tragova od premaza i oznaka bojama i markerima. Posebno su opasni halogeni elementi Cl, F, zatim S i niskotaljive legure (Pb) i metali zbog moguće pojave pukotina i korozije uz naprezanje [7].

### 3. TIG ZAVARIVANJE

#### 3.1. Opis i razvoj TIG zavarivanja

TIG zavarivanje, tj. zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova je postupak zavarivanja taljenjem kod kojeg se energija potrebna za zavarivanje dovodi kroz električni luk koji se održava između radnog komada i netaljive elektrode. Proces se koristi nužno pod zaštitom plina, i to inertnog, koristeći samo toplinsku energiju izvora s mogućnošću korištenja dodatnog materijala ili bez. Zaštitna atmosfera oko taline i zagrijanog vrha elektrode osigurana je inertnim plinovima. TIG tehnologija zavarivanja, poznata i pod imenom GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ili WIG (Wolfram Inert Gas). Tungsten je engleski naziv za volfram, a to opisuje netaljivu elektrodu koja je od volframa (može biti legirana i s nekim drugim metalima, o kojima će biti riječi kasnije). Inertni ili neaktivni plin je argon, ili helij, a također postoje i njihove mješavine u raznim omjerima (ponekad i s nekim drugim plinovima), ovisno o uvjetima zavarivanja [13].

Proces je razvijen u kasnim 1930-ima za zavarivanje nemagnetskih materijala, prvenstveno magnezija i aluminija i za metale koji se teško zavaruju. Zbog visoke kvalitete zavora, TIG zavarivanje je postalo neophodan postupak za mnoge proizvođače, uključujući one u zrakoplovnoj, nuklearnoj, petrokemijskoj, vojnoj, poluvodičkoj industriji itd. Ovaj proces doživljava stalne napretke tako da su razvijeni uređaji samo za ovaj postupak koji imaju mogućnost kontrole impulsa struje. Razvijeni su sustavi hlađenja na bazi vode i zraka za gorionike. Razvoj plinova za zavarivanje poboljšava performanse zavarivanja. Koriste se aktivatori i praškom punjene žice kao dodatni materijali koji utječu na veću penetraciju i olakšavaju zavarivanje. Daljnji napredak ovih postupaka ide u pravcu automatske kontrole, opreme, parametara, kvalitete zavora, sigurnosnih zahtjeva itd [13].

Prema ISO 4063 : 2009. značajno su proširene opcije kod TIG zavarivanja:

- 141 TIG zavarivanje punom žicom ili šipkom
- 142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala
- 143 TIG zavarivanje s praškom punjenom žicom ili šipkom
- 145 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i pune žice ili šipke
- 146 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i praškom punjene žice ili šipke



147 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom primjenom aktivnog plina (TAG zavarivanje)

Uz uvođenje novih oznaka u ovu grupu zavarivačkih postupaka po prvi puta se može naznačiti opcija hladna/vruća žica ako se koristi dodatni materijal. Hladna žica ima oznaku C, a vruća žica ima oznaku H [14].

Prema [15], trendovi u razvoju kod TIG zavarivanja su sljedeći:

- Uspostava el. luka i razvoj elektroda (lantanov oksid - zamjena za torij)
- Dodatni materijali (praškom punjene žice)
- **A-TIG** - primjena aktivacijskih premaza
- K-TIG - visoko penetracijski postupak- „keyhole”
- Automatsko dodavanje materijala
- Vruća i hladna žica
- Impulsna struja kvadratnog oblika
- Visoke frekvencije impulsnog zavarivanja
- „dual-gas” sustav

### **3.2. Stupanj automatizacije TIG zavarivanja**

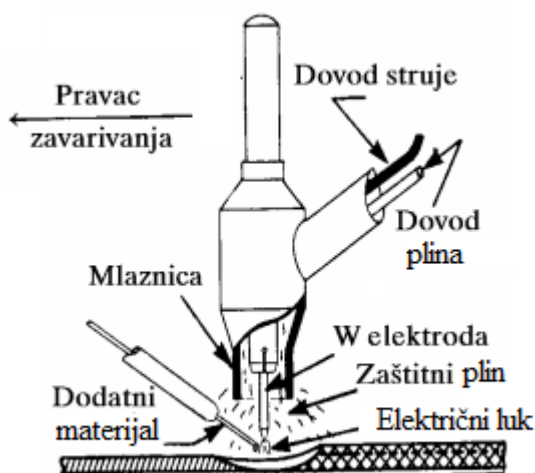
#### **3.2.1. Ručno TIG zavarivanje**

Električna struja dolazi iz izvora struje zavarivanja, priključenog na električnu mrežu, jednim kabelom na radni komad, a drugim kabelom na pištolj za zavarivanje (u pištolju struja prelazi na W-elektrodu ). Visokofrekventna električna struja dolazi iz posebnog uređaja vodičima na radni komad i pištolj, odnosno W-elektrodu. Zaštitni plin iz čelične boce gumenim crijevom dovodi se do mjesta zavarivanja putem sapnice u pištolju. Zavarivač u jednoj ruci drži pištolj, a u drugoj ruci dodatni materijal, kao što je prikazano na slici 7. Pritiskom na prekidač koji se nalazi na pištolju počinje protjecati zaštitni plin i sredstvo za hlađenje pištolja. Pištolj se približi mjestu zavarivanja na razmak 2 do 5 mm. Uspostavlja se električni luk koji tali osnovni materijal. Zavarivač povremeno dodaje žicu koja se tali u prednjem rubu taline osnovnog materijala i zajedno s talinom osnovnog materijala skrutnjuje u zavareni spoj. Tijekom zavarivanja zavarivač pomiče pištolj i dodatni materijal određenom brzinom po pripremljenom spoju.



Slika 7. Ručno TIG zavarivanje [18]

Na slici 8. dan je shematski prikaz ručnog TIG zavarivanja gdje je vidljiva volframova elektroda, dodatni materijal, smjer zavarivanja, položaji držanja dodatnog materijala te ulazi za dovod plina i struje. Prestankom pritiska na prekidač pištolja, prekida se električni luk, a zaštitni plin još neko vrijeme istječe i štiti talinu i vrh elektrode. Za to vrijeme zavarivač ne odmiče pištolj s mjesta zavarivanja [16, 17].



Slika 8. Shematski prikaz ručnog TIG zavarivanja [19]

### **3.2.2. Poluautomatsko TIG zavarivanje**

Princip rada poluautomatskog TIG zavarivanja je isti kao i kod ručnog, s tim da se pritiskom na gumb na pištolju još uključuje i elektromotorni sustav za dovod žice. Sustav za dovod žice, nalazi se u komandnom ormariću. Brzina gibanja žice koja dolazi pod električni luk gdje se tali zajedno s osnovnim materijalom može se regulirati. Dinamički efekti gibanja žice osiguravaju stabilan i upravljiv zavarivački proces. Slika 9. prikazuje pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [20]. Pištolj je u principu sličan osnovnoj izvedbi kao kod ručnog zavarivanja. Razlika je jedino u tome što kod poluautomatsko zavarivanja ima dodatni uređaj koji je pričvršćen za pištolj s prednje strane i služi za dodavanje dodatnog materijala. Pošto je taj dio za dovod dodatnog materijala, uz njega je potrebna i popratna oprema, crijevo za dovod žice i kolut za žicu s mehanizmom dodavanja žice.



Slika 9. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [20]

### **3.2.3. Automatizirano TIG zavarivanje**

Zavarivanje TIG postupkom moguće je automatizirati, što podrazumijeva automatizaciju sa ili bez robota. Automatizacijom je zavar moguće izvesti bez utjecaja ljudskih faktora na zavar, te povećati kvalitetu izvedenog zavora, naročito kod većih serija, te ubrzati samo zavarivanje. Robotska stanica uključuje svu dodatnu opremu uključujući izvor struje za TIG zavarivanje, pištolj i upravljačko sučelje.

### 3.3. Prednosti i nedostaci

**Prednosti** TIG zavarivanja [13]:

- primjenjiv je za zavarivanje svih metala
- primjenjiv je za sve oblike i položaje radnog komada
- nema rasprskavanja kapljica metala
- nema čišćenja troske
- nema dima i štetnih plinova
- ako je zavareni spoj izveden ispravno, tada spada u najkvalitetniji zavareni spoj
- zavar je vrlo čist, gladak i lijep
- električni luk je vrlo stabilan (osigurava visokokvalitetno zavarivanje)
- zavareni spojevi su homogeni, dobre estetike i dobrih mehaničkih svojstava
- koristi se za zahtjevne materijale (nehrđajući čelici, Al, Ti, Cu, itd)

**Nedostaci** TIG zavarivanja [13]:

- neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6mm),
- otežan rad na otvorenom kod većih strujanja zraka (narušavanje zaštitne atmosfere)
- cijena zaštitnog plina
- visoki zahtjevi prema kvaliteti, stanju, točnosti i čistoći u pripremi zavarenog spoja
- mala brzina zavarivanja (10 – 15 cm/min)
- skupa oprema

### 3.4. Parametri kod TIG zavarivanja

Jakost struje za zavarivanje i priprema spoja za zavarivanje ovise o vrsti i debljini osnovnog materijala. Područje jakosti struje zavarivanja je **od 40 do 400 A**. Kod TIG postupka veoma su bitni početak i prekid zavarivanja. Prije početka zavarivanja preporuča se provjera parametara na pomoćnoj bakrenoj pločici (pri čemu se pištolj osuši od eventualne vlage). Kada se uspostavi električni luk, početno se mjesto prije dodavanja žice dobro pretali. Suvremeni TIG uređaji imaju mogućnost postupnog smanjenja struje električnog luka. Kada se električni luk prekine, pištolj ostaje na mjestu završetka sve do prestanka strujanja zaštitnog plina (oko 3 - 10 s) [21].

Odabir parametara prilikom zavarivanja određuje kakva će biti kvaliteta zavara nakon zavarivanja, pa stoga treba obratiti posebnu pozornost na njihov odabir. Utjecajni čimbenici na kvalitetu zavara koji se mogu mijenjati i koji se odabiru prilikom TIG zavarivanja su: jakost struje zavarivanja, napon zavarivanja, polaritet elektrode, vrsta i promjer volframove elektrode, protok i vrsta zaštitnog plina, brzina zavarivanja, položaj pištolja i dodatnog materijala, dodavanje žice i gibanje pištolja (tehnika rada) [22]. Tablica 6. prikazuje orijentacijske podatke za TIG zavarivanje **nehrđajućih čelika**.

Tablica 6. Orijentacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika [22]

| Debljina lima (mm) | Oblik spoja                            | Ø elektrode (mm) | Ø žice (mm) | Jakost struje (mm)                  | Protok Argona (l/min) |
|--------------------|--|------------------|-------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 1,5                | I-spoj<br>Preklopni spoj<br>Kutni spoj | 1,6              | 1,6         | 40 – 60<br>50 – 70<br>50 – 70       | 7                     |
| 3,0                | I-spoj<br>Preklopni spoj<br>Kutni spoj | 2,4              | 2,5         | 65 – 85<br>90 – 110<br>90 – 110     | 7                     |
| 5,0                | I-spoj<br>Preklopni spoj<br>Kutni spoj | 3,2              | 3,0         | 100 – 125<br>125 – 150<br>125 – 150 | 10                    |
| 6,0                | I-spoj<br>Preklopni spoj<br>Kutni spoj | 3,2              | 3,0         | 135 – 160<br>160 – 180<br>160 – 180 | 10                    |

### 3.4.1. Napon i struja zavarivanja

Napon zavarivanja proporcionalan je visini električnog luka (visina električnog luka iznosi približno promjer elektrode, ili manje) prilikom zavarivanja, a kod TIG zavarivanja iznosi od **15 do 35 V**. Povezan je s jačinom struje prilikom zavarivanja preko strme statičke karakteristike izvora [21].

Jakost struje zavarivanja bira se prema vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, obliku i dimenzijama spoja, te položaju zavarenog spoja. Kod ručnog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika za sučeljeni spoj u vodoravnom položaju jakost struje iznosi približno **30 A** za svaki milimetar debljine lima. Prilikom zavarivanja u prisilnom položaju jakost struje zavarivanja je 25 % manja. Kod mehaniziranog TIG zavarivanja jakost struje zavarivanja je veća nego kod ručnog zavarivanja, i to za onoliko koliko se mogu povećati brzine zavarivanja [21].

Polaritet elektrode određuje se prema vrsti metala koji se zavaruje. Aluminij i magnezij, te njihove legure se zavaruju izmjeničnom strujom, mada se mogu zavarivati i istosmjernom strujom, elektrodom na plus polu (koja omogućuje čišćenje oksidnog sloja), ali ne tako uspješno kao s izmjeničnom strujom. Koristeći istosmjernu struju elektroda može biti spojena na negativni (DC-) ili pozitivni (DC+) pol.

#### **a) Istosmjerna struja, elektroda na negativnom polu**

Svi metali osim aluminija i magnezija, pa tako i **austenitni nehrđajući čelici**, zavaruju se s istosmjernom strujom (DC), i to elektrodom na minus polu (DC-). U tom se slučaju obradak grije više, a elektroda manje. Na tom polaritetu elektroni putuju s negativne elektrode na pozitivni radni komad dok pozitivni ioni putuju s radnog komada prema elektrodi. Budući da elektroni imaju veću sveukupnu kinetičku energiju od iona, brže se zagrijava mjesto zavarivanja na radnom komadu, a manje vrh elektrode, pa je samim time moguće veće strujno opterećenje elektrode. S takvim polaritetom i elektrodom legiranom s 2% torija, 70% topline se generira na radnom komadu što omogućava dublju penetraciju. Ako se polaritet elektrode ne postavi na ovaj način nego na plus potencijal, doći će do erodiranja elektrode uslijed pregrijavanja [18, 21].

#### **b) Istosmjerna struja, elektroda na pozitivnom polu**

Prilikom zavarivanja elektroni teku prema vrhu pozitivne elektrode i jako je zagrijavaju, pa je potreban veći promjer elektrode. Budući da dolazi do „izbijanja“ elektrona iz površine radnog komada, što uzrokuje razaranje površinskih oksida na aluminiju, moguće je zavarivanje aluminija i ostalih lakih metala na ovaj način, uz primjenu elektrode većeg promjera. Međutim, kada je veći promjer elektrode, a mala jakost struje zavarivanja, dolazi do smanjenja stabilnosti električnog luka, te njegovog nesmetanog „šetanja“ po zaobljenom dijelu elektrode, što dakako smanjuje razaranje oksida, te dubinu protaljivanja [18, 21].

#### **c) Izmjenična struja**

Izmjenična struja je struja čiji tok elektrona mijenja smjer (pozitivan i negativan) u vremenu. Cilj je postići što bržu promjenu struje, da se dobije što veća iskoristivost uređaja za zavarivanje, budući da struja teče u valovima, tj. titra, a na vrhovima je najveća struja, te se želi postići što duže zadržavanje na tim vrhovima.

Prilikom zavarivanja izmjeničnom strujom, u električnom luku se mijenja pravac kretanja čestica sto puta u sekundi (kod struja frekvencije 50 Hz), što znači da je elektroda pedeset puta u sekundi na pozitivnom polu, a pedeset puta na negativnom polu. Nedostatak

električnog luka izmjenične struje je u tome što kod mijenjanja pravca gibanja čestica dolazi do teoretskih „gašenja“ i „paljenja“ električnog luka, što ga čini nestabilnim. Zbog toga se na izvor struje dodaje uređaj koji proizvodi visokonaponsku visokofrekventnu električnu struju, koja daje snažne izboje u svakom nultom periodu i poboljšava stabilnost električnog luka. [18,21]

Promjer elektrode se bira prema jačini električne struje, i to na sljedeći način [23]:

1. Elektrode iz čistog volframa mogu se opteretiti strujama jakosti blizu 50 A po milimetru promjera elektrode

2. Elektrode legirane s torijem mogu se opteretiti strujom jakosti od 60 do 80 A po milimetru promjera elektrode

Opterećenje volframove elektrode pravilnom jakosti struje, da bi imala što duži vijek trajanja i da bi bila manja onečišćenja zavarenog spoja volframom, određuje se prema izrazu [23]:

$$I = 100 \times \varnothing_{\text{elektrode}} \times k \quad [\text{A}] \quad (3)$$

gdje je:

$\varnothing_{\text{elektrode}}$  – promjer elektrode [mm]

$k$  – koeficijent opterećenja jakosti struje zavarivanja koji ovisi o vrsti elektrode (između 0,3 i 1) kao što prikazuje tablica 7. za različite vrste elektroda. Više o navedenim vrstama elektroda nalazi se u poglavlju 3.5.4.

Tablica 7. Primjeri koeficijenata  $k$  za različite vrste elektroda [23]

| Vrsta elektrode | W    | WT 10 | WT 20 | WT 30 | WT 40, WZ 8. WL 10 |
|-----------------|------|-------|-------|-------|--------------------|
| $k_{\min}$      | 0,45 | 0,4   | 0,35  | 0,3   | 0,5                |
| $k_{\max}$      | 0,55 | 0,65  | 0,75  | 0,8   | 1                  |

Kod pravilno opterećene volframove elektrode, na zašiljenom vrhu elektrode formira se mala kapljica oblika sitne kuglice, kroz koju se održava stabilan električni luk. Kod preopterećene elektrode javlja se brže njeno trošenje, te onečišćenje zavara volframom, a prilikom premalog opterećenja elektrode javlja se nestabilan električni luk. Prilikom mijenjanja promjera elektrode potrebno je promijeniti steznu kontaktnu cjevčicu za koju je pričvršćena elektroda u pištolju, te stezač volframove elektrode.

### 3.4.2. Protok i vrsta zaštitnog plina

Protok plina prilikom TIG zavarivanja prema [21] ovisi o:

1. Vrsti materijala koji se zavaruje
2. Jakosti struje zavarivanja
3. Tehnici zavarivanja
4. Mjestu rada
5. Vrsti zaštitnog plina

U tablici 8. prikazani su standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja. Plinovi koji su zaokruženi plavim kvadratima mogu se koristiti kod TIG zavarivanja **nehrđajućih austenitnih čelika**.

Tablica 8. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [24]

| Proizvod  | Tipske komponente<br>mješavina s Ar | Grupa po<br>HRN EN439 | Primjena   |
|---|-------------------------------------|-----------------------|--|
| Argon   |                                     | I1                    | visoko legirani i nelegirani čelici,<br>alumijski materijali, ostali neželjezni metali           |
| Inoxmix H   | 2 % H <sub>2</sub>                  | R1                    | austenitni CrNi-čelici   |
|   | 5 % H <sub>2</sub>                  | R1                    | (5 % i 7,5 % H <sub>2</sub> potpuno mehanizirani)  |
|   | 7,5 % H <sub>2</sub>                | R1                    |  |
| Inoxmix N   | 1,25 % N <sub>2</sub>               | SI1                   | duplex, super-duplex,  |
|   | 2,5 % N <sub>2</sub>                | SI1                   | potpuno austenitni CrNi-čelici   |
|   | 15 % He, 1,25 % N <sub>2</sub>      | SI3                   |  |
| Helij 4.6   |                                     | I2                    | aluminij (minus pol-zavarivanje),<br>čelici (orbitalno zavarivanje)                              |
| Alumix He   | 30 % He                             | I3                    | aluminij, bakar  |
|   | 50 % He                             | I3                    | nikal,   |
|   | 70 % He                             | I3                    | čelici (orbitalno zavarivanje),  |
|   | 90 % He                             | I3                    | TIG - zavarivanje istosmjernom strujom   |
| Alumix N  | 0,015 % N <sub>2</sub>              | SI1                   | alumijski materijali i legure  |
| Alumix He N   | 15 % He, 0,015 % N <sub>2</sub>     | SI3                   | alumijski materijali i legure  |
|   | 30 % He, 0,015 % N <sub>2</sub>     | SI3                   |  |
|   | 50 % He, 0,015 % N <sub>2</sub>     | SI3                   |  |
| Argon 4.8   |                                     | I1                    | materijali osjetljivi na plinove kao što su titan,<br>niob, molibden, tantal,<br>zaštita korjena |
| Formir plin<br>(N <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> mješavine) | 5 % H <sub>2</sub>                  | F2                    | zaštita korjena kod visoko i nisko<br>legiranih čelika   |
|   | 10 % H <sub>2</sub>                 |                       |  |
|   | 15 % H <sub>2</sub>                 |                       |  |

Protok plina se kreće se od 4 l/min do 20 l/min. Kod zavarivanja Al i Mg količina zaštitnog plina argona iznosi oko 6 l/min na 100 A, a povećanjem jakosti struje za svakih daljnjih 100 A iznosi otprilike 4 l/min više. Pri zavarivanju **nehrđajućih čelika** potrošnja plina je za oko 25 % manja i iznosi oko **4,5 l/min na 100 A**.



Potrebno je biti posebno oprezan prilikom namještanja protoka zaštitnog plina kod zavarivanja, jer prevelika količina zaštitnog plina stvara nemirno strujanje, te vrtloženje izlazećeg plina, što stvara unošenje zraka, a time i štetnih plinova u talinu zavora, što negativno utječe na mehanička svojstva zavora. Ako se pak zavaruje s premalom količinom zaštitnog plina, plin se lako otklanja s mjesta zavora, te time mjesto zavora nije dovoljno zaštićeno, što također rezultira lošim mehaničkim svojstvima zavora [21].

Utjecaj sastava zaštitnog plina na penetraciju i geometriju zavarenog spoja uz konstantne ostale parametre zavarivanja (struja, vrsta i promjer netaljive volfram elektrode, kut zašiljenosti netaljive volfram elektrode, udaljenost netaljive volfram elektrode od radnog komada...) prikazan je na slici 10.



Slika 10. Utjecaj vrste plina i mješavine plinova na oblik zavora i penetraciju [25]

Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu koja se može što lakše ionizirati te što bolje štititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U tu svrhu koriste se inertni plinovi: argon (Ar), helij (He) i njihove mješavine.

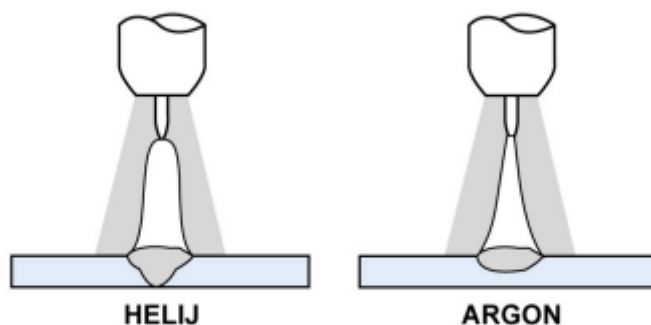
### Usporedba plinova Ar i He

Argon je približno 10 puta teži od helija, ali ima slabiju toplinsku vodljivost. Za isti intenzitet zaštite taline potrebno je dva do tri puta više helija od argona kod zavarivanja u vodoravnom

položaju. Argon daje stabilniji električni luk, ali i manju dubinu protaljivanja kod iste jakosti i vrste električne struje zavarivanja što se i vidi na slici 11.

Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti osnovnog materijala i njegovoj primjeni:

- **Argon** - je najčešće korišteni zaštitni plin koji se primjenjuje za zavarivanje konstrukcijskih čelika, **nehrđajućih čelika**, aluminija i titana.
- **Argon + Vodik (2 do 5 %)** – ta mješavina prilikom zavarivanja ima reducirajući efekt, što omogućuje bolji izgled zavara bez površinske oksidacije. Električni luk je uži, ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja.
- **Argon + Helij (do 50%)** – helij utječe na povećanje energije električnog luka što mu omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Veliki nedostatak ove mješavine je visoka cijena i poteškoće tijekom uspostavljanja električnog luka.
- **Argon + Dušik (1 do 3%)** – zavarivanje duplex i **austenitnih čelika** te Ni-legura.
- **Argon, Dušik, Dušik/Vodik** – koriste se za zaštitu korijena zavara [26] .



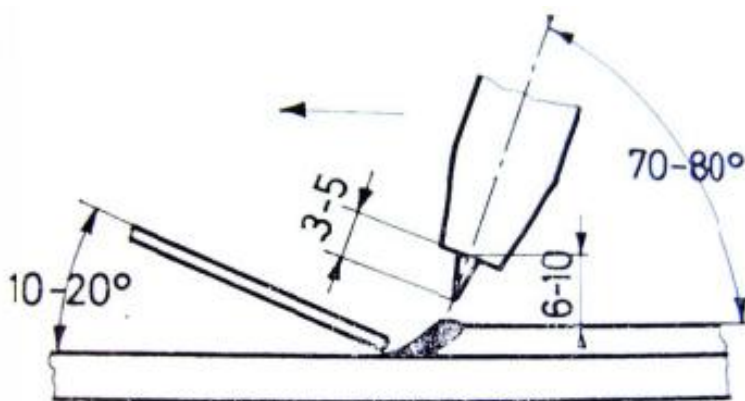
Slika 11. Oblik i učinak električnog luka kod helija (He) i argona (Ar) [26]

### 3.4.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja kod ručnog TIG postupka iznosi od **100 do 250 mm/min** [2]. Brzina zavarivanja je najpovoljnija kada je dužina taline dva do tri puta veća od promjera volframove elektrode, a kod zavarivanja u prisilnom položaju je znatno manja (jer bi u suprotnom došlo do curenja taline pod utjecajem gravitacijske sile). Brzina zavarivanja utječe i na penetraciju, te na izgled površine zavara [21].

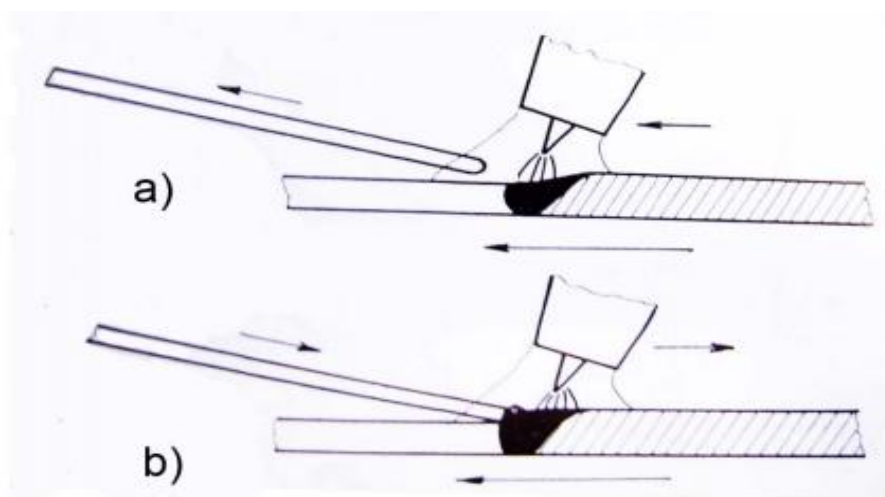
### 3.4.4. Pištolj i dodatni materijal

Na slici 12. prikazan je položaj pištolja i dodatne žice kod ručnog postupka TIG zavarivanja. Prikazani nagib koristi se kod svih položaja zavarivanja, a kod mehaniziranog zavarivanja je uglavnom bolje okomit nego kod ručnog. Udaljenost vrha elektrode od početka sapnice iznosi do 5 mm. Udaljenost sapnice od površine taline može biti i veća od 10 mm, ovisno o jačini struje zavarivanja [21].



Slika 12. Položaj pištolja i dodatnog materijala kod ručnog TIG zavarivanja [21]

Dodatni materijal je u obliku žice, a obično se dodaje kod zavarivanje metala debljina većih od 3,2 mm. Dodavanje žice i gibanje pištolja kod ručnog zavarivanja obavlja se specifičnom tehnikom koja je prikazana na slici 13. Žica se drži u lijevoj, a pištolj u desnoj ruci pod određenim nagibom prikazanom na toj slici. Nakon što se zagrije osnovni materijal do stvaranja taline, pištolj se povlači unatrag (ne previše zbog zaštitnog plina), a istovremeno se vrh žice (dodatnog materijala) doda u prednji rub taline. Nakon što se rastali, povuče se nazad, a istovremeno se kreće pištoljem u daljnje zagrijavanje i pretaljivanje osnovnog metala. Taj se proces ponavlja sve dok se ne postigne željena duljina zavara [21].

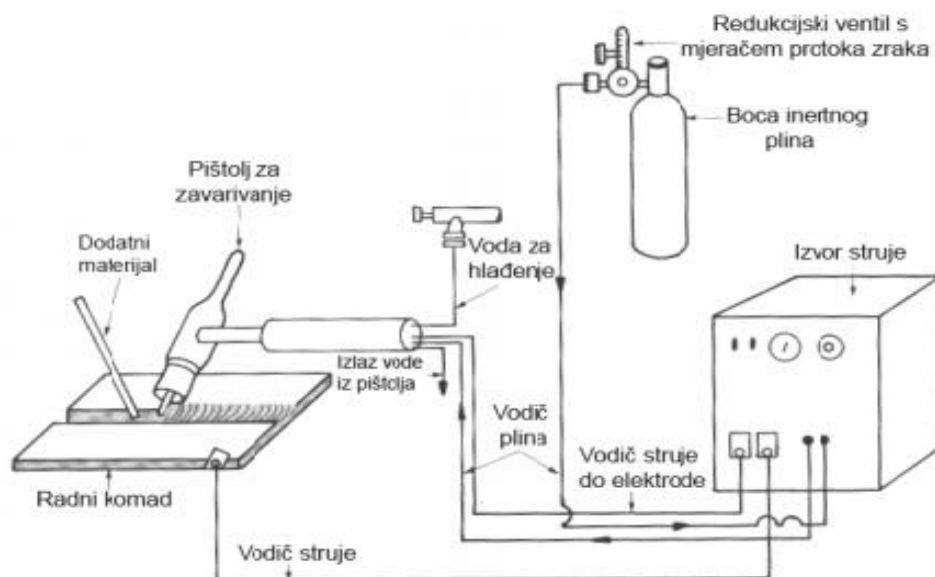


- a) kod kretanja pištolja naprijed izmaknuti žicu i rastaliti samo osnovni materijal  
 b) povući pištolj malo unazad, a žicu dodati na prednji rub taline

Slika 13. Prikaz tehnike ručnog TIG zavarivanja [21]

### 3.5. Oprema za TIG zavarivanje

Na slici 14. prikazana je oprema za ručno TIG zavarivanje. Oprema za ručno TIG zavarivanje sastoji se od izvora struje, pištolja za zavarivanje (elektroda i sapnica), rashladnog sustava, sustava za dovod struje i plina te boce inertnog plina.

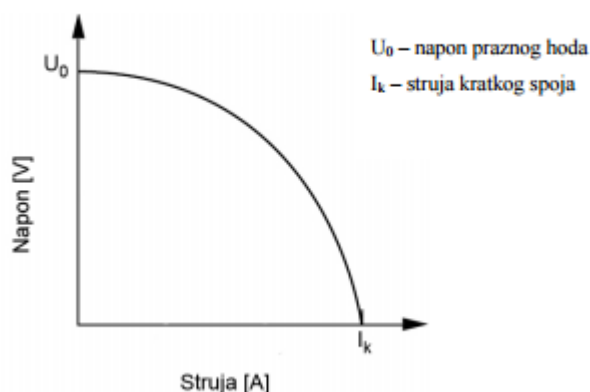


Slika 14. Oprema za ručno TIG zavarivanje [27]

### 3.5.1. Izvor struje

Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, motorgeneratori i transformatori.

Izvori struje za **ručno** zavarivanje trebaju imati strmo padajuću karakteristiku da se osigura približno konstantna struja zavarivanja neovisno o promjenama dužine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača (slika 15.)



Slika 15. Strma karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [26]

Kod **mehaniziranog** zavarivanja gdje je osigurana konstantna dužina luka mogu se primjeniti i izvori s ravnom karakteristikom.

Uređaj za proizvodnju visokofrekventne električne struje je dodatni mali **transformator**, koji proizvodi električnu struju visokog napona od nekoliko tisuća volti, te se ugrađuje na izvore izmjenične i istosmjerne struje zavarivanja. Budući da je frekvencija struje jako visoka (20 do 50 kHz), ne postoji opasnost po život. Ona služi za uspostavljanje električnog luka bez dodira vrha elektrode s radnim komadom, te za održavanje stabilnosti električnog luka kod zavarivanja s izmjeničnom strujom.

Današnji izvori struje su pretežito izvori čija je jakost struje elektronički kontrolirana i u koje su ugrađeni **inverteri**. Izvor struje tijekom zavarivanja stalno provjerava izlaz struje na električnom luku sa strujom koja je tražena prilikom zavarivanja, a definirana samim izvorom struje [26]. Uređaji za TIG zavarivanje su uglavnom građeni kombinirano te se koriste kao transformatori i kao ispravljači.

Intermitencija ili radni ciklus uređaja za zavarivanje je od izuzetne važnosti prilikom zavarivanja. Definira se kao vrijeme rada izvora struje za zavarivanje određenom jačinom struje prije nego dolazi do prekoračenja određene temperature i taljenja izolacije izvora struje [26].

Na slici 16. prikazan je izvor za TIG zavarivanje tvrtke Fronius naziva „TransTig 1750 Puls / Set“. Ovaj izvor može se primjenjivati za REL i TIG zavarivanje konstrukcijskih, feritnih, duplex i **austenitnih CrNi čelika**.



Slika 16. Izvor struje za TIG zavarivanje [28]

Osnovne karakteristike ovog uređaja prikazane su u tablici 9. Iz nje se mogu očitati osnovni podaci o izvoru zavarivanja. Dimenzije izvora za zavarivanje su relativno male, pa je zbog toga prikladan za prenošenje (mogućnost terenskog zavarivanja). Napon praznog hoda je baš zbog terenskog rada (mogućnost upotrebe veće dužine polikabla, za zavarivanje na većim udaljenostima od izvora) nešto viši od uobičajenog i iznosi 93 V. Kod intermitencije 100% izvor zavarivanja može praktično neprekidno davati iznos struje od 120 A.

Tablica 9. Karakteristike izvora zavarivanja „TransTig 1750 Puls / Set“ [28]

|  | TransTig 1750 Puls G/F |
|--|------------------------|
| Dimenzija / š                                  | 180mm                  |
| Masa   | 9,1kg                  |
| Dimenzija / v                                  | 280mm                  |
| Dimenzija / d                                  | 430mm                  |
| Frekvencija                                    | 50-60Hz                |
| Osigurač                                       | 16A                    |
| Klasa zaštite                                  | IP23                   |
| Napon praznog hoda                             | 93V                    |
| Napon napajanja [+/-10%]                       | 230V                   |
| Napon  | 10,1-16,8V             |
| Struja zavarivanja / Radni ciklus [10min/40oC] | 120A / 100%            |
| Struja zavarivanja / Radni ciklus [10min/40oC] | 170A / 35%             |
| Struja zavarivanja / Radni ciklus [10min/40oC] | 135A / 60%             |

### 3.5.2. *Pištolj za zavarivanje*

Pištolj za zavarivanje sadrži volfram elektrodu koja dovodi električnu struju za uspostavljanje električnog luka te usmjerava zaštitni plin. Pištolji su podijeljeni po jakosti struje zbog opasnosti od pregrijavanja. Pištolji za ručno TIG zavarivanje različitih su oblika i veličina. Mogu se podijeliti na dvije osnovne grupe [13]:

1. Hlađenje rashladnim sredstvom (voda, antifriz) - vodeno hlađeni pištolji se hlade prolaskom vode kroz kanaliće u držaču pištolja. Voda ulazi kroz ulaznu cijev, struji kroz pištolj te izlazi kroz izlaznu cijev. Vodeno hlađeni pištolji se koriste kod većih raspona struja npr. 300 – 500A, a proizvedeni su i pištolji koji mogu podnositi jakosti struje do 1000A. Ovakvi pištolji se pretežno koriste u automatiziranoj proizvodnji.

2. Hlađenje strujanjem zraka - pištolji, koji se ne hlade rashladnom tekućinom nego samo zrakom, primjenjuju se za manje jakosti struje zavarivanja 150 – 200 [A] i kraća vremenska opterećenja.

Tipičan pištolj koji se najčešće primjenjuje prikazan je na slici 17. sastoji se od:

1. držač za ruku – u držaču za ruku završavaju svi provodnici (električne struje za zavarivanje, električne struje za komande, dovod i odvod vode, dovod plina). Na držaču se nalazi taster (prekidač) za ukapčanje električnih komandi, a na sami pištolj spojen je snop provodnika (“polikabel“) dužine 5 – 8 [m] koji je priključen na komandni ormarić ili na izvor struje zavarivanja.

2. stezač elektrode sa steznom kontaktnom cijevčicom

3. sapnica za plin

4. volframova elektroda

5. zaštitna kapa na volframovoj elektrodi



Slika 17. Dijelovi pištolja za ručno TIG zavarivanje [29]

### 3.5.3. Sapnica

Služi za usmjeravanje plina tokom zavarivanja, a može biti različitih oblika i veličina, ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja. Najčešće korištene izvedbe sapnice su konusnog, cilindričnog ili profiliranog oblika. Sapnica može biti izrađena od različitih materijala koji su otporni na visoke temperature. Najčešće je izrađena od vatrootpornog minerala, keramike (za manje i srednje jakosti struje zavarivanja) i iz kromiranog bakra hlađena vodom (za veće jakosti struje zavarivanja). Keramička sapnica prikazana je na slici 17. Izbor veličine sapnice se određuje prema promjeru elektrode za zavarivanje, budući da je kod veće jakosti struje zavarivanja potrebna i veća količina zaštitnog plina kao i veći promjer elektrode. Kod elektroda manjeg promjera (do promjera 2,4 mm) odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:6. Kod elektroda većeg promjera taj odnos je približno 1:4. Ako sapnica dovoljno ne brtvi, dolazi do uvlačenja zraka uslijed injektorskog djelovanja struje izlazećeg plina.

Na kraj otvora sapnice se može staviti mrežica koja poboljšava stabilnost protoka plina i na taj način sprječava turbulencije, te je protok zaštitnog plina stabilan i na većim udaljenostima od sapnice do radnog komada [21].



### 3.5.4. Elektroda

Elektroda kod TIG zavarivanja služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektroda je netaljiva i ako se ispravno koristi ona se ne tali i ne prenosi u zavar. Temperatura tališta volframa je 3410 °C. Dosezanjem te temperature volfram postaje izvor elektrona zbog termoelektronske emisije. Spomenuta temperatura postiže se zagrijavanjem elektrode zbog električnog otpora, pri kojem ne dolazi do taljenja zbog emisije elektrona na vrhu elektrode koja uzrokuje značajno hlađenje. Tako je vrh elektrode hladniji od dijela elektrode iznad vrha do vanjsko hlađene kontaktne cjevčice. Volfram elektroda je netaljiva, no uslijed erozije vrha, te njegovom prljanju u slučaju nehotičnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši [30, 31] Elektrode su klasificirane po legirnim elementima te se identificiraju pomoću boja (tablica 10.).








Čiste volfram elektrode (W) sadrže minimalno 99,5% volframa bez dodataka legirnih elemenata. Čiste volfram elektrode se koriste kod nižih struja zavarivanja nego legirane te se pretežno koriste s AC izvorima.

Elektrode legirane s torijem mogu biti legirane s 1% (EWTh-1) ili s 2% (EWTh-2) torijevog oksida  $\text{ThO}_2$ . Elektrode legirane s torijem mogu provoditi 20% jaču električnu struju nego čiste volfram elektrode. Lakše je paljenje luka i luk je stabilniji, a koristi se s DC izvorima. Koristi se za TIG zavarivanje **nehrđajućih austenitnih čelika**.

Elektrode legirane s cerijevim oksidom ( $\text{CeO}_2$ ) i s lantanovim oksidom ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) su se pojavile '80-ih godina u SAD-u jer za razliku od torija nisu radioaktivne. EWCe-2 sadrži 2% cerijevog oksida dok EWLa-1 sadrži 1% lantanovog oksida. Obje se koriste s AC i DC izvorima struje.

Elektrode legirane s cirkonijevim oksidom ( $\text{ZrO}_2$ ) su po svojstvima između čistih i elektroda legiranih s torijevim oksidom [30].

Tablica 10. Klasifikacija elektroda [30]

| ISO OZNAKA | AWS KLASIFIKACIJA | BOJA   | LEGIRNI ELEMENT | LEGIRNI OKSID           |
|------------|-------------------|--|-----------------|-------------------------|
| W          | EWG               | Zelena      | /               | /                       |
| WT 40      | EWCe-2            | Narančasta  | Cerij           | $\text{CeO}_2$          |
| WL 10      | EWLa-1            | Crna        | Lantan          | $\text{La}_2\text{O}_3$ |
| WT 10      | EWTh-1            | Žuta        | Torij           | $\text{ThO}_2$          |
| WT 20      | EWTh-2            | Crvena      | Torij           | $\text{ThO}_2$          |
| WZ 4       | EWZr-1            | Smeđa       | Cirkonij        | $\text{ZrO}_2$          |
| WC 20      | EWG               | Siva        | Nije određeno   | /                       |

Kod ispravno opterećene volframove elektrode na oštrom vrhu formira se mala kapljica taline volframa u obliku kuglice kroz koju se održava stabilan električni luk. Kod zaobljenog vrha elektrode ne stvara se takva kapljica nego vrh ostaje zaobljen. Kod zavarivanja je samo krajnji vrh volframove elektrode vidljivo zagrijan.

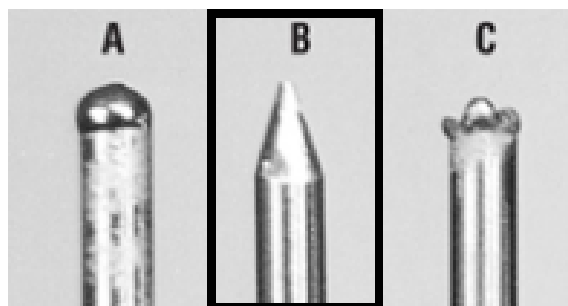
Oblik vrha volframove elektrode može biti šiljastog ili zaobljenog oblika te ovisi o tome koji se metal zavaruje, odnosno kojom se vrstom električne struje zavaruje [31].

Ako se zavaruju aluminij, magnezij ili njihove legure u pravilu treba uzimati elektrodu od čistog volframa (zelena ili cirkorirana elektroda), a vrh elektrode treba zaobliti (elektroda A slika 18.).

Vrh elektrode za **austenitne nehrđajuće čelike** mora biti zašiljen pod određenim kutem, kao što je to na slici 18. (elektroda pod oznakom B). To je 2 % torirana volframova elektroda koja radi pri istosmjernoj električnoj struji na minus polu. Zašiljeni vrh je svijetlog izgleda [32].

Za zavarivanje **austenitnog nehrđajućeg čelika** debljine lima 1,5 [mm] odgovara torirana elektroda promjera  $d = 1,6$  [mm], limu od 3 [mm] odgovara elektroda promjera  $d = 2$  [mm], limu od 5 [mm] odgovara elektroda promjera  $d = 2,4$  ili 3,2 [mm], dok limu od 6 [mm] odgovara elektroda promjera  $d = 3,2$  [mm].

Elektroda C je također 2 % torirana volframova elektroda koja je radila pri izmjeničnoj struji kod zavarivanja aluminija. Na zaobljenom vrhu vidi se mali oštri izdanak koji je karakterističan kod ovakvih elektroda [32].



Slika 18. Primjeri izgleda vrhova korištenih elektroda [32]

### **3.5.5. Rashladni sustav**

Rashladni sustav se upotrebljava za hlađenje pištolja, a rashladna sredstva koja se koriste su voda (deionizirana i destilirana) i/ili antifriz, te primjese antikorozivnih dodataka, a dovode se crijevima.

Tri su vrste rashladnih sustava, koji su ugrađeni u sklopu aparature za TIG zavarivanje [13]:

1. Otvoreni – crijevo se priključuje direktno na vodovod
2. Zatvoreni centralni – sastoji se od velikog spremnika za vodu i crpke koja služi za pogon vode po dijelovima aparature
3. Zatvoreni pojedinačni – sastoji se od malog spremnika, hladnjaka, elektromotora i crpke

U sustavima koji imaju ugrađenu crpku, antifriz je bolje rashladno sredstvo, jer ujedno podmazuje crpku. Potrebno je osigurati da postoji dobro brtvljenje sustava, posebno na pištolju za zavarivanje, jer ako se na pištolju stvara kondenzat, vodik iz vode može ući u zavar, te stvara poroznost zavora, što loše utječe na mehanička svojstva samog zavora [13].

### **3.5.6. Sustav za dovod zaštitnog plina**

Služi za dovod plina do mjesta zavarivanja, a sastoji se od [13]:

1. Čelične boce ili spremnika plina
2. Redukcijskog ventila s mjerачem protoka plina – na redukcijskom ventilu regulira se protok plina
3. Crijeva za dovod plina s magnetskog ventila na pištolj
4. Magnetskog ventila – pritiskom na gumb koji se nalazi na pištolju uključi se magnetski ventil, te poteče plin (prije uspostavljanja električnog luka, da se izbaci zrak iz crijeva i mjesta zavarivanja); prestankom držanja gumba na pištolju, najprije se prekida električni luk, a zaštitni plin još neko vrijeme teče (1 s za svakih 10 A jakosti struje kojom se zavaruje, zbog zaštite taline koja se skrućuje i zagrijanog vrha elektrode koji se hladi)
5. Crijeva za dovod plina do pištolja

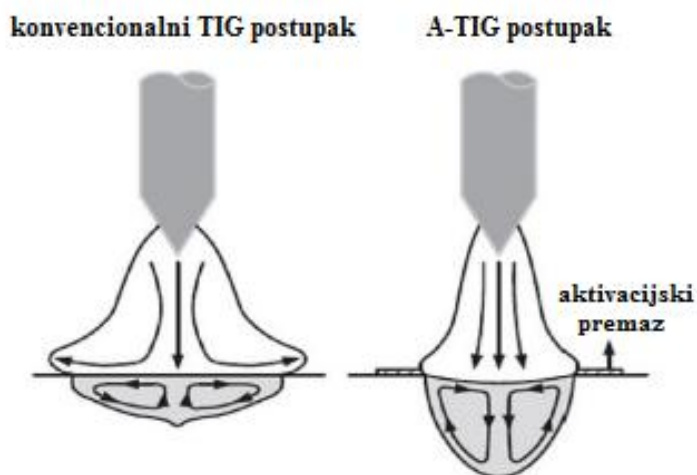
## **4. TIG ZAVARIVANJE UZ POMOĆ AKTIVACIJSKOG PREMAZA (A-TIG)**

### **4.1. Uvod**

Kao što je već navedeno, konvencionalni TIG postupak zavarivanja ima određene nedostatke od kojih su najznačajniji slaba penetracija i mali depozit, a posljedica tih nedostataka je smanjena produktivnost u usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja koji se koriste u proizvodnji. Za debljine veće od 3 mm potrebno je zavarivati u više prolaza i to jako smanjuje proizvodnost postupka. Zbog navedenih razloga uveden je A - TIG postupak zavarivanja s aktivacijskim premazom.

A – TIG postupak zavarivanja je postupak u kojem se tanki sloj premaza aktivnog talila nanese na osnovni materijal i to samo na područje koje će se zavarivati. Aktivno talilo naziva se još i aktivacijski premaz. Aktivacijski premazi znatno povećavaju penetraciju kod TIG zavarivanja. Popularno nazvana A-TIG talila omogućuju znatno povećanje produktivnosti procesa zavarivanja. Aktivacijski premazi prvi put su primijenjeni 1950-ih na “EO Paton Institute of Electric Welding ” u Kievu (Ukrajina). Prvi objavljeni znanstveni radovi datiraju iz 1960-tih godina u kojima je detaljno proučen i opisan utjecaj aktivacijskog premaza na zavarivanje titanovih legura. Glavni razlog istraživanja i primjene tih premaza u zavarivanju jest postizanje što veće penetracije naspram konvencionalnog TIG postupka, a veća penetracija omogućuje manji broj prolaza i na taj način povećava se produktivnost zavarivanja. Adekvatnom primjenom aktivacijskog premaza moguće je kod TIG postupka postići potpunu protaljenost u jednom prolazu materijala debljine čak do 12 mm [33].

Na slici 19. prikazana je usporedba dubine protaljivanja kod konvecionalnog i aktivacijskog TIG postupka zavarivanja. Iz slike je vidljivo da konvencionalan TIG postupak daje slabiju protaljenost od A-TIG postupka.



Slika 19. Usporedba protaljivanja TIG i A-TIG postupka [34]

#### 4.2. Svojstva i sastav aktivnog premaza

Ovisno o kemijskom, mehaničkom i toplinskom ponašanju materijala, aktivacijski premaz može se prilagoditi, odnosno mijenjati. To znači da takav premaz ima dobru sposobnost kvašenja površine što utječe na oblik taline, a sastav premaza se mijenja ovisno o površini na kojoj se primjenjuje. Istraživanja još nisu u potpunosti razjasnila na koji način kvašenje površine ima utjecaj na učinkovitost da zaštiti površinu taline. Kako bi premaz utjecao na povećanje gustoće energije u električnom luku te samim time na povećanje penetracije, mora sadržavati velike elektrone poput oksida, halida i fluorida. Aktivacijski premaz sastoji se od različitih komponenata u prahu koje se naknadno miješaju s acetonom ili etanolom [35].

Komponente koje mogu činiti sastav aktivnog talila za zavarivanje nehrđajućih čelika su [36]:

- Titanijev (IV) oksid ( $\text{TiO}_2$ ),
- Silicijev (IV) oksid ( $\text{SiO}_2$ ),
- Kromov (III) oksid ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ),
- Niklov (II) oksid ( $\text{NiO}$ ),
- Bakrov (II) oksid ( $\text{CuO}$ ).

Jedan od zahtjeva za efektivnost aktivacijskog premaza je da talište bude približno slično talištu osnovnog materijala. Također, premaz ne smije tvoriti stabilne čvrste faze s talinom zavara jer bi u tom slučaju naštetilo izgledu zavara i svojstvima zavarenog spoja [35].

#### 4.3. Komercijalno dostupni aktivacijski premazi

Pošto je ovaj postupak zavarivanja relativno noviji, nije mnogo ispitivan niti korišten. Samim time nema mnogo komercijalno dostupnih aktivacijskih premaza.

Neki od komercijalno dostupnih aktivacijskih premaza:

1. QUICK TIG: koristi se za sve vrste nehrđajućih čelika, poboljšana penetracija do 300 % što omogućuje zavarivanje u 1 prolazu do 10 mm debljine osnovnog materijala, zavarivanje bez ikakve pripreme spoja, omogućuje zavarivanje s nižim unosima topline te do 200 % brže zavarivanje, ekološki ispitan... Navedeni premaz prikazan je na slici 20. pod brojem 1 [37].

2. PATIG - S – A: koristi se za sve vrste nehrđajućih čelika, za manganske čelike i niskolegirane čelike. Dostupan je u obliku premaza i spreja. Navedeni aktivator dostupan u obliku spreja prikazan je na slici 20. pod brojem 2 [38].

3. FASTIG<sup>TM</sup> SS-7: koristi se za sve vrste nehrđajućih čelika, za manganske čelike i niskolegirane čelike [33].

4. SOLAR FLUX: koristi se za nehrđajuće čelike i niklove legure, prvenstveno za zaštitu korijena od oksidacije, miješa se s metanolom, prikladan za cijevi... [39].



Slika 20. Komercijalno dostupni premazi [37, 38]

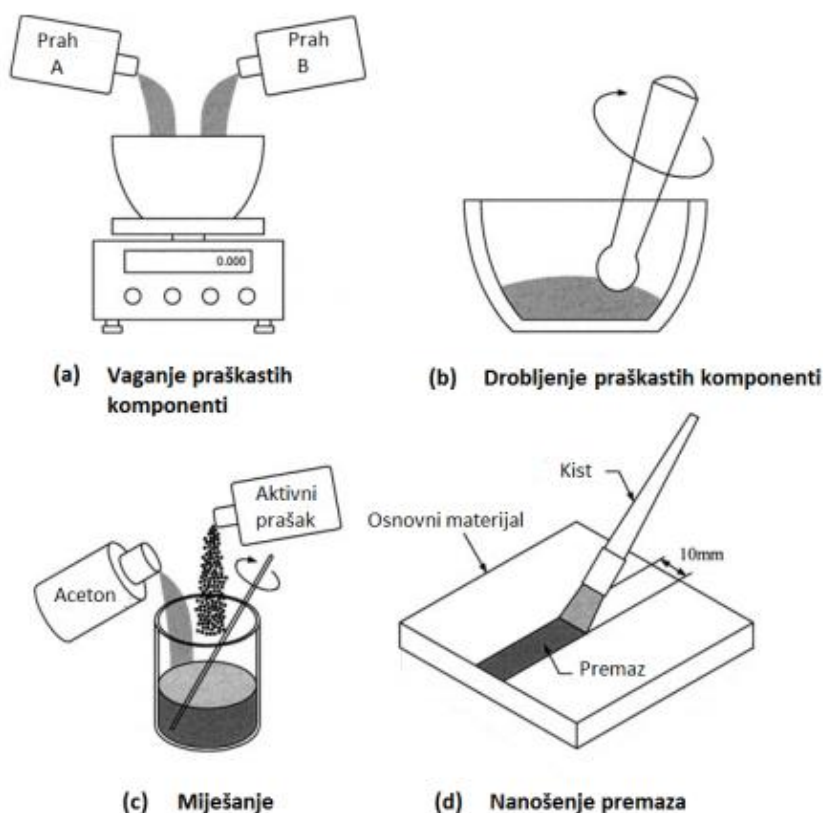
#### 4.4. Princip rada A-TIG zavarivanja s aktivacijskim premazom

Princip rada A-TIG zavarivanja s aktivacijskim premazom identičan je konvencionalnom TIG postupku, samo što se prije zavarivanja nanosi sloj aktivacijskog premaza.

Postupak izrade aktivacijskog premaza sastoji se od [36]:

- a) Određivanje udjela praškastih komponenti,
- b) Usitnjavanje i homogenizacija praškastih komponenti,
- c) Miješanje praškastih komponenti s acetonom kako bi se omogućilo kvašenje,
- d) Nanošenje dobivenog aktivnog talila pomoću kista tj. ručno ili automatizirano

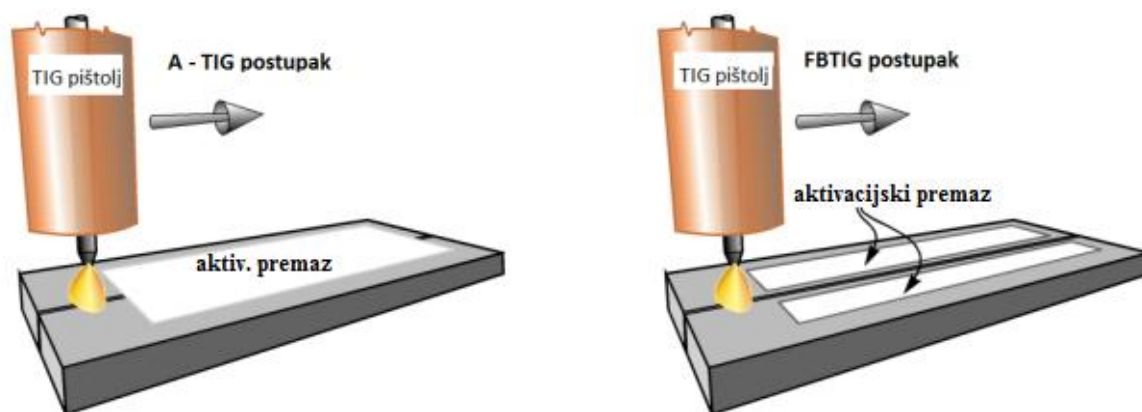
Pri nanošenju je potrebno obratiti pozornost da premaz ne curi unutar spoja i da je debljina premaza što više ujednačena kako bi se osigurala optimalna stabilnost procesa. Navedeni proces izrade, miješanja i nanošenja aktivacijskog premaza shematski je prikazan na slici 21. Nakon što su izvršeni svi koraci navedenog postupka, pristupa se zavarivanju. Pištoljem za TIG zavarivanje prolazi se preko površine koja je premazana aktivacijskim premazom [36].



Slika 21. Shematski prikaz pripreme, miješanja i nanošenja aktivacijskog premaza [40]

#### 4.4.1. Načini nanošenja aktivacijskog premaza

Što se tiče postupka nanošenja aktivacijskog premaza, razlikujemo dvije vrste, a jedina razlika između njih jest u području u kojem se nanosi premaz. Prvi postupak naziva se A – TIG postupak kod kojeg se premaz nanosi preko čitave površine koja se zavaruje. Drugi postupak naziva se FBTIG, što je skraćenica za inačicu A – TIG postupka zavarivanja čiji je originalni naziv Flux – Bonded TIG i kod ovog postupka se ostavlja određena praznina po kojoj se vrši zavarivanje. FBTIG postupak ima određene prednosti u odnosu na A – TIG kod ručnog zavarivanja zbog manje ovisnosti stabilnosti procesa o debljini premaza Slika 22. prikazuje shemu zavarivanja kod A – TIG postupka i kod FBTIG postupka zavarivanja [41].



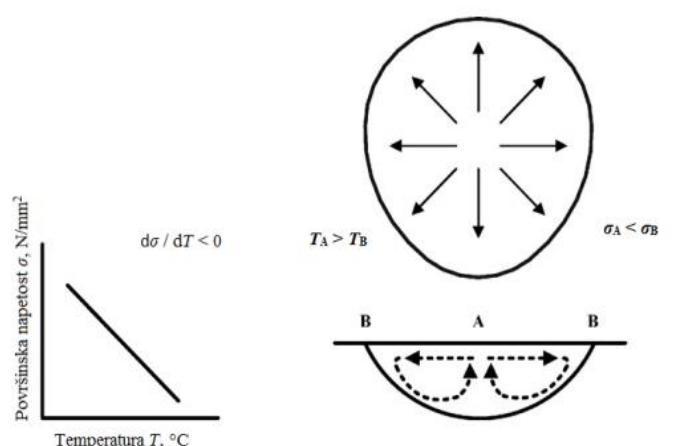
Slika 22. Shema postupka A – TIG i FBTIG postupka zavarivanja [41]

#### 4.5. Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na dubinu penetracije

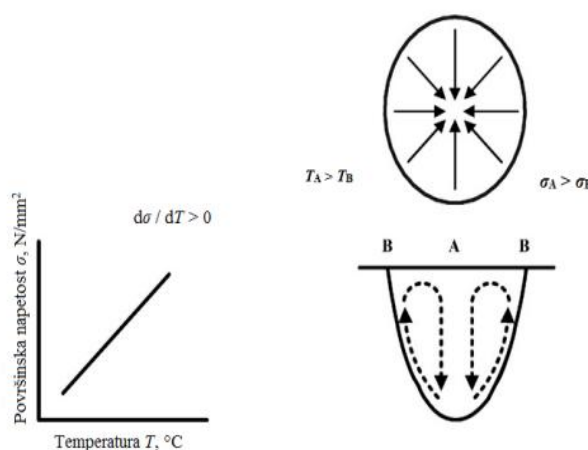
Što se tiče dostupne literature, nigdje nije potpuno objašnjeno kako aktivni premaz utječe na oblik taline zavara, no mnogi koji su se bavili istraživanjem svojstava i utjecaja aktivnog premaza na zavareni spoj složili su se da postoje dva glavna mehanizma utjecaja aktivnog premaza. Prvi mehanizam objašnjen je pomoću Marangonijevog efekta strujanja fluida, a drugim mehanizmom se smatra povećanje energije električnog luka zbog kontrakcije, odn. suženja električnog luka. Kod većine istraživanja utjecaja aktivacijskog premaza kod TIG zavarivanja **nehrđajućih austenitnih čelika** utvrđeno je da premaz ima odlična svojstva



kvašenja površine koja utječu na oblik taline i da se komponente premaza mogu mijenjati, odnosno prilagoditi ovisno o površini gdje se namjerava primijeniti kako bi se poboljšalo kvašenje površine. Još nije u potpunosti razjašnjeno kakav utjecaj ima kvašenje površine na učinkovitost premaza da zaštiti površinu taline. Smatra se da samo kvašenje površine zavara i promjena površinske napetosti premaza nemaju nikakvu poveznicu s Marangonijevim efektom strujanja taline materijala unutar taline, ali Marangonijev efekt strujanja fluida iskorišten je za objašnjavanje različitih profila taline kod TIG i A-TIG postupaka zavarivanja penetracije zavara. Glavni razlog promjene strujanja taline materijala jest u različitim toplinskim koeficijentima površinskih napetosti taline (TKPN). Marangonijev efekt strujanja fluida prikazan je na slici 23. [33].



a) Centrifugalni Marangonijev efekt

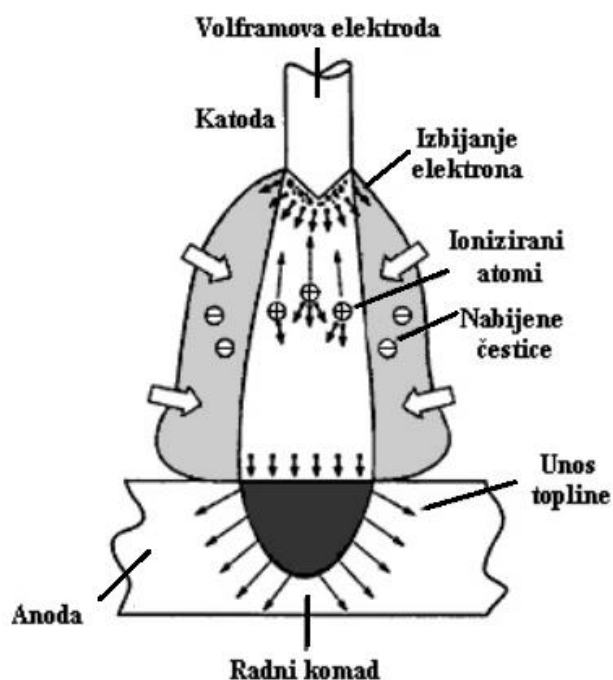


b) Centripetalni Marangonijev efekt

Slika 23. Marangonijev efekt strujanja fluida [42]

Kada se koristi TIG proces bez aktivnog talila TKPN poprima negativnu vrijednost. To znači da hladnija periferna strana taline ima veću površinsku napetost od same sredine. Zbog takve raspodjele površinskih napetosti generira se centrifugalni Marangonijev efekt u talini zavora (slika 23.a). U takvim uvjetima, tok taline se lakše odvija od centra taline zavora prema rubovima tvoreći široki i plitki profil zavora, odnosno manja je penetracija. Kada se koristi aktivacijski premaz (A – TIG postupak zavarivanja), vrijednost TKPN-a se mijenja iz negativne u pozitivnu. Stoga su površinske napetosti veće u centru taline zavora nego na rubovima. Posljedica takvih raspodjela površinskih napetosti je smjer strujanja taline iz rubnih krajeva taline prema sredini tj. centripetalni Marangonijev efekt (Slika 23.b.). Zbog toga će profil zavora imati znatno veću penetraciju i suženi profil [33, 42].

Simonik je bio samo jedan od istraživača koji se bavio istraživanjem djelovanja aktivacijskog premaza pri zavarivanju. Svojim istraživanjem pokušao je dokazati tezu da se učinkovitost premaza temelji na suženju električnog luka, te da sastav aktivacijskog premaza znatno utječe na kvalitetu električnog luka. Lucas i Howse nadopunili su njegov princip apsorpcije elektrona koji za posljedicu ima suženje električnog luka i povećanje penetracije zavora. Njihov mehanizam kontrakcije električnog luka prikazan je na slici 24.



Slika 24. Mehanizam kontrakcije električnog luka [33]

Zbog velike razlike potencijala između katode i anode, kako bi se održala konstantna struja, elektroni brzo ubrzavaju i predaju svu kinetičku energiju anodi (radnom komadu). Potrebna toplina bez koje se ne može formirati talina proizlazi iz prijenosa kinetičke energije elektrona koji se apsorbiraju u površini radnog komada. Količina unesene topline u osnovni materijal definirana je stečenom energijom elektrona tijekom ubrzavanja i sudaranja s površinom. Uži električni luk povećava temperaturu na anodi, što ima za posljedicu veću gustoću struje pri većem naponu električnog luka. Smatra se da aktivacijski premaz za vrijeme isparavanja sužuje električni luk tako što zahvaća elektrone u vanjskom dijelu luka prema istraživanju koje je objavio Simonik [33].

Princip apsorpcije elektrona odvija se tako da se elektroni vežu uz isparavajuće molekule i disocirane atome stvarajući negativno nabijene čestice. Tako pričvršćeni elektroni mogu zauzeti mjesta samo u "hladnijem" perifernom dijelu snopa gdje imaju znatno manju energiju. U samom centru električnog luka prevladava ionizacija što omogućuje znatno veće temperature i energiju elektrona, pa prema tome ograničava struju u središnjem dijelu što povećava gustoću struje i rezultira užim lukom na anodi, a samim time postiže se i veća penetracija [33].

Širina električnog luka ovisi o molekulama i atomima koji imaju veliki poprečni presjek. Spojevi koji sadrže halogene elemente imaju i veliki afinitet prema elektronima kad disociraju, a metalni oksidi su jednako efikasni pri sužavanju električnog luka jer pružaju znatno veći broj isparavajućih molekula i atoma koji se nalaze u vanjskom dijelu električnog luka, iako imaju nešto manji poprečni presjek za prihvaćanje elektrona i znatno veću temperaturu disocijacije [33].

Neki od razloga rijetke primjene modificiranoga A – TIG postupka, odnosno moglo bi se reći i nedostaci ovog postupka su manjak informacija o sastavu aktivacijskog premaza, nedostatak informacija o njegovom utjecaju na formiranje zavara (taline), moguće je postizanje lošijih mehaničkih i korozijskih svojstava zavara i utjecaj debljine premaza aktivacijskog premaza na stabilnost električnog luka

#### 4.6. Prednosti A – TIG postupka i svojstva zavarenog spoja

Zavarivanjem TIG postupkom u zaštiti inertnog plina (Ar, He), uz upotrebu aktivacijskog premaza, postiže se niz tehnoloških karakteristika koje ovaj postupak dovode u dominantan položaj u odnosu na klasičan TIG postupak zavarivanja. A-TIG postupak zavarivanja predstavlja progresivni postupak zavarivanja, jer se istim smanjuju: vrijeme pripreme, vrijeme zavarivanja, utrošak dodatnog materijala i zaštitnog plina (argona) i smanjuje broj neposrednih operatera - zavarivača.

Neke od prednosti su [43]:

- kod A - TIG postupka zavarivanja ne koristi se dodatni materijal i postupak se realizira samo kretanjem, odnosno vođenjem gorionika za zavarivanje duž linije spoja,
- postupak je mnogo lakši za izvođenje, prilagodljiviji za prinudne položaje zavarivanja i za težu pristupačnost zavarenih spojeva u montažnim uvjetima, pogotovo kada se radi o termoenergetskim, tj. kotlovskim postrojenjima,
- Postupak je lakši za mehanizaciju, odnosno automatizaciju, što je posebno važno pri zavarivanju cijevi,
- u zoni zavarivanja, dolazi do kontrakcije električnog luka uz istovremeno smanjenje otpora rastaljenog metala njegovoj penetraciji, a bez povećanja jačine struje zavarivanja i bez dodatne potrošnje zaštitnog plina,
- povećanje dubine protaljivanja - kvalitetan i pouzdan zavareni spoj u jednom prolazu do 12 mm debljine (jednostrano zavarivanje) i u dva prolaza do 24 mm debljine pri obostranom zavarivanju,
- zahvaljujući visokoj penetracijskoj sposobnosti moguće je naknadno otklanjanje grešaka u zavarenom spoju ponovnim protaljivanjem tih mjesta,
- osigurava dugotrajne zavarene spojeve čelika bez skošavanja i bez zazora stranica žljeba i to: sučeonih, kutnih i preklopnih spojeva – „I“ priprema spoja bez zazora.
- omogućuje veće brzine zavarivanja

Primjenom A-TIG postupka zavarivanja postižu se zavareni spojevi koji se po kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima gotovo ne razlikuju od osnovnog materijala. Postiže se kvalitetan zavareni spoj s manjim vrijednostima jakosti struje zavarivanja, manjim vremenom

zavarivanja po jednom prolazu i sa tri do pet prolaza manje po zavarenom spoju u odnosu na konvencionalan TIG postupak zavarivanja.

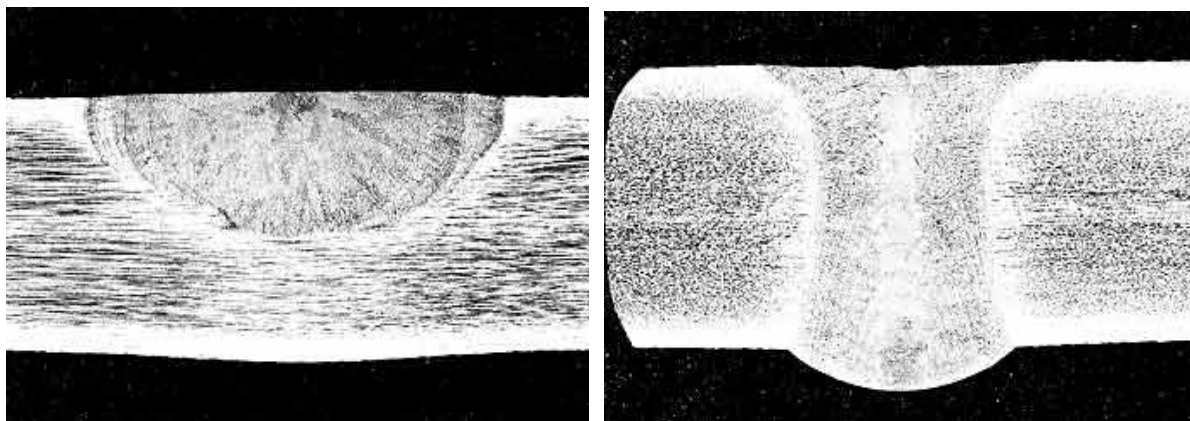
Primjena A-TIG postupka zavarivanja garancija je za dobivanje zavarenih spojeva visoke čvrstoće i pouzdanosti, s dugim vijekom trajanja, i to na čelicima različitih klasa. Metal zavora tako zavarenog spoja je sitnozrnate strukture koja ima povećanu otpornost prema formiranju toplih i hladnih pukotina jer se povećava vrijednost kritične brzine deformacije, odnosno hlađenja, pri kojoj dolazi do nastanka navedenih pukotina [43].

#### **4.7. Pregled postojećih tehnologija zavarivanja uz primjenu aktivacijskih premaza**

Prema [33] objavljeno je istraživanje u kojem se dokazivalo da se i neelektrolučnim postupcima kao što su lasersko zavarivanje i zavarivanje elektronskim snopom može postići dobro kvašenje površine zavora i promijena površinske napetosti uz primjenu aktivacijskog premaza te tako postići veća penetracija kao kod TIG zavarivanja. Svi uzorci su bili načinjeni tako da je pola uzoraka bilo premazano aktivacijskim premazom a pola ne, a nakon zavarivanja proučavalo se protaljivanje kod uzoraka zavarenih različitim postupcima. Materijal uzoraka je nehrđajući austenitni čelik AISI 304.

##### **4.7.1. TIG zavarivanje**

Kod prvih uzoraka koristio se TIG postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi argona uz nanošenje aktivacijskog premaza. Razmatra se fenomen povećane penetracije primjenom premaza, a identificirano je i povećanje napona luka uz smanjenje struje zavarivanja. Inicijalni TIG pokusi bez primjene premaza također pokazuju povećanje napona luka od 0,5 V, ali ne i smanjenje struje zavarivanja. To se može jasno vidjeti na slici 25. da premaz kod A-TIG postupka uzrokuje povećanu penetraciju i smanjenje širine zavora. Iako se neki dio navedenih obilježja može pripisati povećanju napona i promjeni u brzini hlađenja, također je moguće da je premaz povećao faktor učinkovitosti procesa, odnosno veći dio energije luka prenesen je topline na osnovni materijal. Kod konvencionalnog TIG zavarivanja zavar je širok i plitak, dok se upotrebom aktivacijskog premaza povećava tečenje taline unutar materijala, što osigurava uzak i dubok zavar [33].



a) bez primjene aktivacijskog premaza

b) uz primjenu aktivacijskog premaza

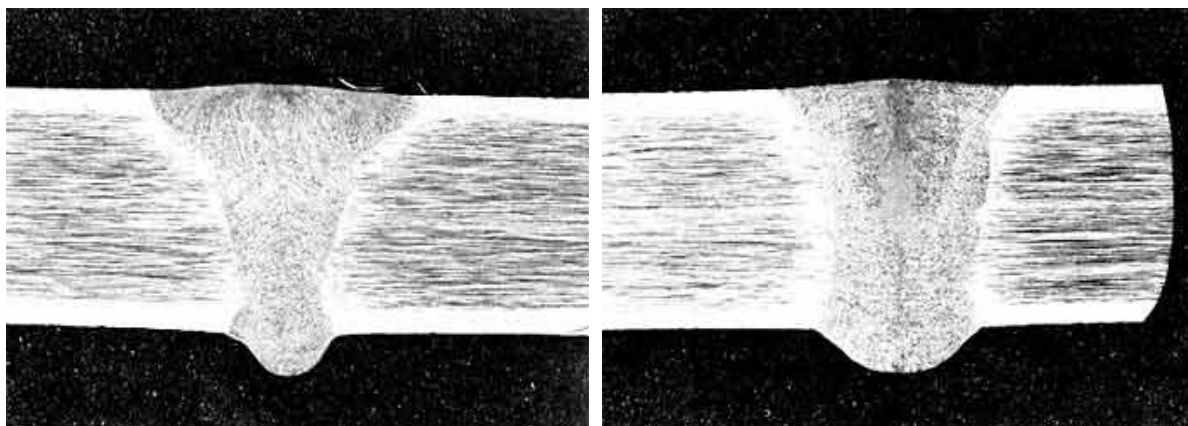
Slika 25. Makroizbrusak TIG zavora [33]

#### 4.7.2. Plazma zavarivanje

Makroizbrusak plazmom zavarenog spoja i primjenom kontinuirane vrijednosti struje (177 A) prikazan je na slici 26. Vidi se da je primjenom aktivacijskog premaza povećana širina penetriranog područja kroz čitavi poprečni presjek koji ima veoma sličan izgled kao i kod A-TIG postupka.

Zavari dobiveni plazmom dokazuju da učinak premaza nije ograničen u potpunosti samo na TIG zavarivanje. Očito mehanizmi koji uzrokuju povećanu penetraciju kod A-TIG postupka imaju utjecaj i na plazma zavarivanje s aktivacijskim premazom. Učinak premaza kod plazmom zavarenog spoja nije izražen kao i za A-TIG postupak jer je ionako penetracija kod plazme višestruko veća. Učinak je vidljiv više u profilu zavora nego u samoj penetraciji. Lice zavora je nešto užo, dok je ostatak porečnog presjeka zavora širi što znači da je protaljeno više osnovnog materijala kada se koristio premaz.

Plazma zavari su načinjeni tzv. „metodom ključanice“ zbog toga jer površinska napetost prisiljava talinu (metal zavora) da teče oko plazmenog mlaza, stvarajući tako rupu u obliku ključanice. U usporedbi s TIG-om, potreba za pripremom spoja i dodatnim materijalom je minimalna [33].



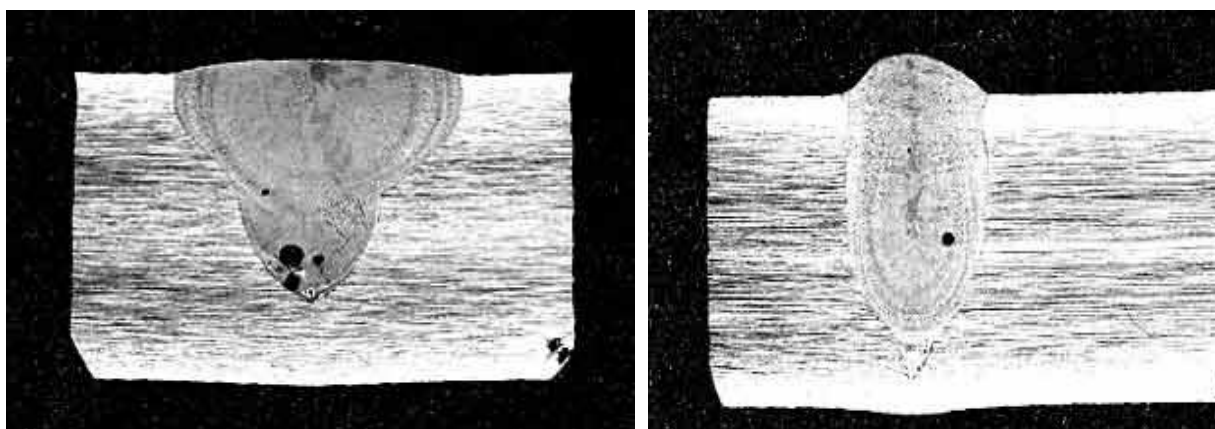
a) bez primjene aktivacijskog premaza

b) uz primjenu aktivacijskog premaza

Slika 26. Makroizbrusak plazma zavara [33]

#### 4.7.3. Lasersko zavarivanje

Aktivacijski premazi se također mogu primjeniti i kod laserskog ( $\text{CO}_2$ ) zavarivanja. Kod zavara je ispitivan utjecaj premaza na talinu s tim da je zanemaren iznos vrijednosti korištene struje. Iz tih zavara se jasno može vidjeti da premaz također ima utjecaj na penetraciju zavara i to sa stajališta širine i dubine zavarenog područja. Primjenom premaza dolazi do smanjenja presjeka metala zavara i do dublje penetracije što je vidljivo iz slike 27.b. Premaz pridonosi suženju laserskog snopa čime sprječava raspršivanje zraka, a time i stvara veću gustoću, odnosno snagu snopa. To povećanje snage laserskog snopa dovodi do povećanja taline koja prodire u dubinu i daje veću penetraciju.



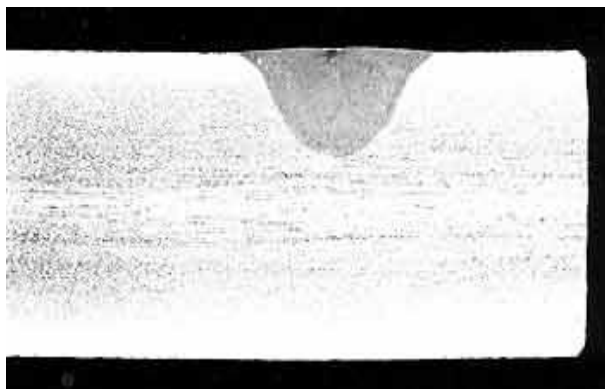
a) bez primjene aktivacijskog premaza

b) uz primjenu aktivacijskog premaza

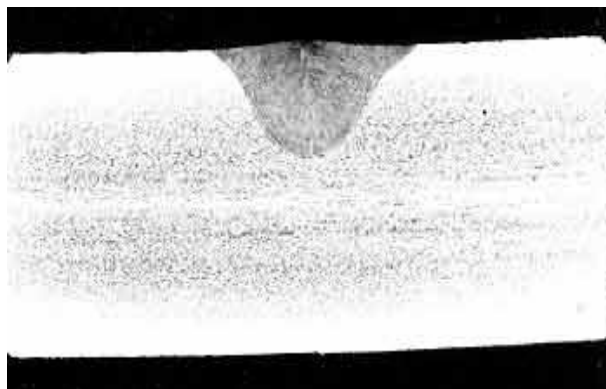
Slika 27. Makroizbrusak laserskog zavara [33]

#### 4.7.4. Zavarivanje elektronskim snopom

Zavarivanje elektronskim snopom provedeno je radi istraživanja djelovanja aktivacijskog premaza kod postupka gdje nema električnog luka. Cilj je razlučivanje utjecaja električnog luka na suženje zavora i površinsku napetost kod primjene premaza. Koristeći kombinaciju fokusirajućeg i otklonskog snopa elektrona izmjenjena je gustoća snage snopa kako bi se simulirao tipičan električni luk kao kod TIG postupka. Na slici 28. prikazan je postupak zavarivanja sa i bez aktivacijskog premaza. Iz slike je vidljivo da nema značajne razlike između zavora sa i bez primjene premaza.



a) bez primjene aktivacijskog premaza



b) uz primjenu aktivacijskog premaza

Slika 28. Makroizbrusak zavarenog spoja elektronskim snopom [33]



## **5. EKSPERIMENTALNI RAD**

### **5.1. Opis eksperimenta**

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Cilj istraživanja jest proučiti ponašanje i utjecaj aktivacijskog premaza pri TIG zavarivanju visokolegiranog nehrđajućeg čelika s aspekta mehaničkih i korozijskih svojstava tako zavarenog spoja. Glavna stavka eksperimentalnog dijela jest dokazati da se primjenom aktivacijskog premaza može postići veća penetracija. Zavarivanje je provedeno TIG postupkom i to automatizirano, kako bi se osigurala preciznost i ponovljivost kod izvođenja svih stanja eksperimenta. Istraživanje se temelji na usporedbi mehaničkih i korozijskih svojstava dva uzorka zavarenih kovencionalnim te dva uzorka zavarenih A-TIG postupkom. Posebno je istražena primjena aktivacijskog premaza kod korijenske zaštite umjesto plina.

Istraživanje je provedeno u kontroliranim uvjetima, prema predviđenom slijedu eksperimenta, nakon strojne obrade uzoraka, na sljedeći način :

1. Vizualna kontrola
2. Makroanaliza uzoraka
2. Statičko vlačno ispitivanje
3. Korozijska ispitivanja

### **5.2. Osnovni materijal**

Kao osnovni materijal korišten je nehrđajući čelik naziva X5CrNi18-10 (AISI 304). Utvrđena mehanička svojstva navedenog materijala prikazan je u tablici 11. Radi se o visokolegiranom austenitnom nehrđajućem čeliku kojeg odlikuju dobra čvrstoća i odlična korozijska otpornost zbog malog udjela ugljika. Tablica 12. prikazuje kemijski sastav osnovnog materijala. Više o navedenom čeliku opisano je u poglavlju 1.4.

Tablica 11. Mehanička svojstva čelika AISI 304 [44]

| Oznaka čelika |       | Mehanička svojstva               |                                       |                     |                   |                    |
|---------------|-------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| EN            | AISI  | $R_m$ , min<br>N/mm <sup>2</sup> | $R_{p0,2}$ , min<br>N/mm <sup>2</sup> | $A_5$ ,<br>min<br>% | $Z$ ,<br>min<br>% | $KU$ ,<br>min<br>J |
| X2CrNi18-9    | 304 L | 450...700                        | 175                                   | 50                  | 60                | 85                 |

Tablica 12. Kemijski sastav osnovnog materijala iskazan u masenim udjelima [44]

| Kemijski element | C    | Cu   | Cr | Ni   | Mn   | Mo    | Si   | V    | Fe      |
|------------------|------|------|----|------|------|-------|------|------|---------|
| w, %             | 0,08 | 0,34 | 18 | 7,81 | 1,32 | 0,262 | 0,32 | 0,19 | ostatak |

### 5.3. Priprema aktivacijskog premaza

U svrhu istraživanja Elektroda Zagreb d.d. donirala je komponente premaza u obliku sitnog praška koje primjenjuju u izradi obloženih elektroda za REL zavarivanje.

U ovom radu kao aktivacijski premazi korištene su visokokonzentrirane suspenzije praškastih komponenti u etilnom alkoholu. Na temelju prijašnjih, dostupnih istraživanja odabrane su praškaste komponente koje su rezultirale zavarenim spojem najveće penetracije, a to je mješavina  $Cr_2O_3$  i  $SiO_2$  (slika 29.).



Slika 29. Komponente primjenjenog aktivacijskog premaza

Omjer čvrste faze (praškaste komponente) i tekuće (96 % etilni alkohol) iznosi 1:2. Dakle, 10 g svake praškaste komponente (ukupno 20 g) dodano je u 40 ml 96 %-tnog etilnog alkohola. Navedena suspenzija izmješena je i pohranjena u čistoj plastičnoj bočici.

## 5.4. Oprema za zavarivanje

### 5.4.1. Izvor struje za zavarivanje

Kao izvor struje za TIG zavarivanje korišten je uređaj tipa „MagicWave 2200 Job“, marke Fronius (slika 30.). Navedeni uređaj može se koristiti za TIG zavarivanje (istosmjerna i izmjenična struja) te za REL zavarivanje. Uređaj također ima mogućnost TIG zavarivanja s impulsnom strujom. Najveća moguća struja zavarivanja iznosi 220 A pri intermitenciji od 35 %. Uređaj je male težine (17,4 kg) i samim time mobilan što ga čini idealnim za radionice, za reparature i održavanja raznih postrojenja. Uređaj se primjenjuje za zavarivanje konstrukcijskih čelika, prokroma, Cr-Ni čelika, aluminija, magnezija... Po potrebi, za maksimalna opterećenja, uređaj se dodatno oprema modularnim hladnjakom i TIG-gorionikom s vodenim hlađenjem. Tehničke karakteristike navedenog uređaja za zavarivanje prikazane su u tablici 13. [45] .



Slika 30. Uređaj za TIG zavarivanje MagicWave 2200 Job [45]

Tablica 13. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje MagicWave 2200 Job [45]

|                                       |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| Napajanje:                            | (-20%/+15%) 230V, 50Hz |
| Strujni opseg TIG-AC/DC:              | 3 – 220 A              |
| Strujni opseg REL:                    | 10 – 180 A             |
| Struja zavarivanja 10min/40°C 35% ED  | 220 A                  |
| Struja zavarivanja 10min/40°C 60% ED  | 170 A                  |
| Struja zavarivanja 10min/40°C 100% ED | 150 A                  |
| Napon praznog hoda                    | 88 V                   |
| Stupanj zaštite                       | IP 23                  |
| Dimenzije /dužina/širina/visina       | 485x180x390 mm         |
| Težina                                | 17,4 kg                |

#### 5.4.2. Oprema za automatiziranje postupka zavarivanja

Pištolj za TIG zavarivanje pričvršćen je na sustav za automatsko zavarivanje pod nazivom „BUGO Systems“. Navedeni uređaj za automatiziranje procesa zavarivanja ima mogućnosti gibanja preko nosača paralelno uz radno mjesto, te mogućnost namještanja željene udaljenosti pištolja od radnog komada i upravljanje brzinama zavarivanja (slika 31.)

Razlog automatizacije postupka je preciznost i ponovljivost kod izvođenja svih stanja pokusa. Na taj način eliminiraju se pogreške i ostali utjecajni čimbenici kao što su nagib pištolja, udaljenost sapnice od radnog komada te ljudski faktor, koji bi mogli imati važan utjecaj na rezultate ispitivanja.



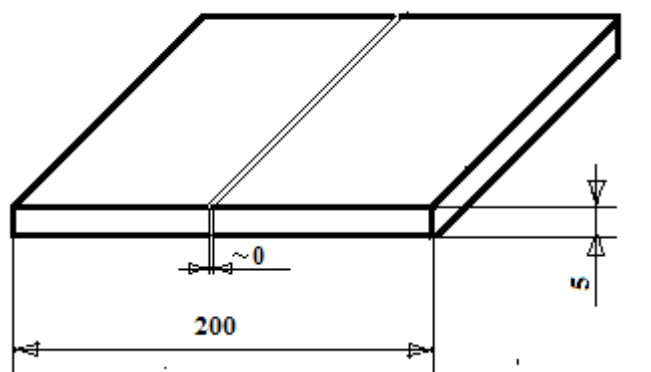
Slika 31. Uređaj za automatiziranje procesa zavarivanja „BUGO Systems“

## 5.5. Zavarivanje

### 5.5.1. Priprema spoja

U eksperimentu su korištene ploče od nehrđajućeg visokolegiranog austenitnog čelika AISI 304 koje su rezane na željene dimenzije. Postupkom plazma rezanja te brušenjem izrađena je potrebna priprema spoja. Dimenzije ploča iznose 100 X 90 X 5 mm. U ovom eksperimentu zavaren je sučeljeni spoj sa „I“ pripremom kao što je prikazano na slici 32. Debljina ploča iznosi 5 mm, a ploče su izrezane iz iste šarže kako bi se isključio utjecaj promijenjenog kemijskog sastava kod usporedbe rezultata.

Površine žlijeba moraju biti bez nečistoća i grešaka. Površina osnovnog materijala očišćena je od površinskih oksida četkom od nehrđajućeg čelika te brusnim papirima (od grubljeg prema finijem gradijentu). Potrebno je voditi računa o obliku spoja, što znači da stranice moraju biti idealno izrezane pod kutem od  $90^\circ$  kako bi se postigla što manja zračnost jer tako zahtijeva ispitivanje. Sve ploče koje su korištene u eksperimentu prije nanošenja premaza očišćene su u etanolu.

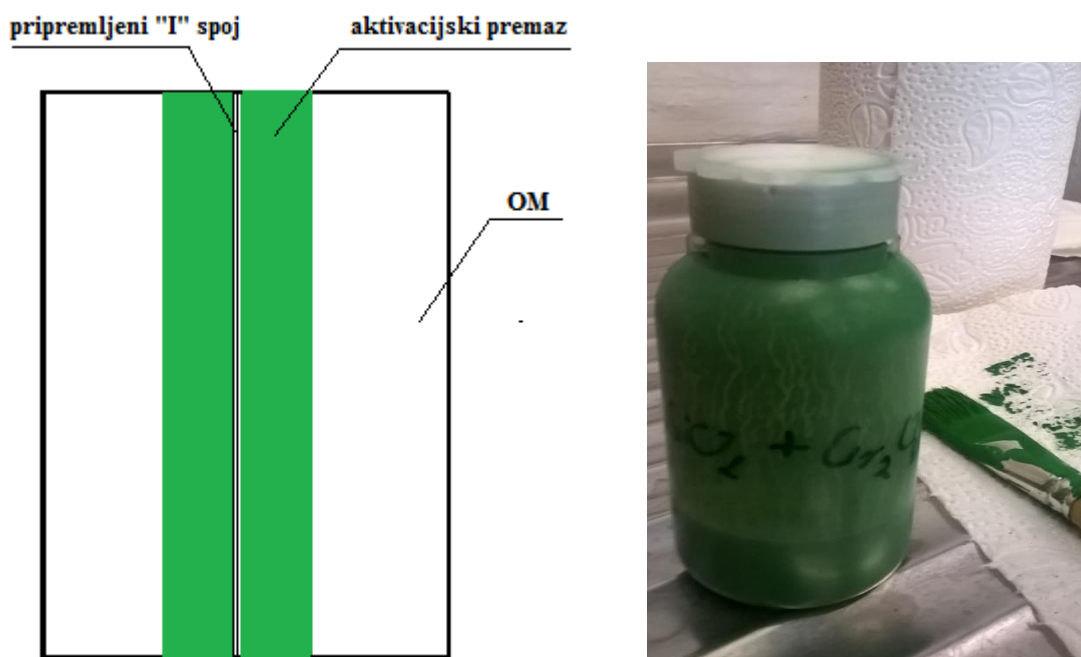


Slika 32. Shematski prikaz pripreme „I“ spoja

### 5.5.2. Postupak zavarivanja

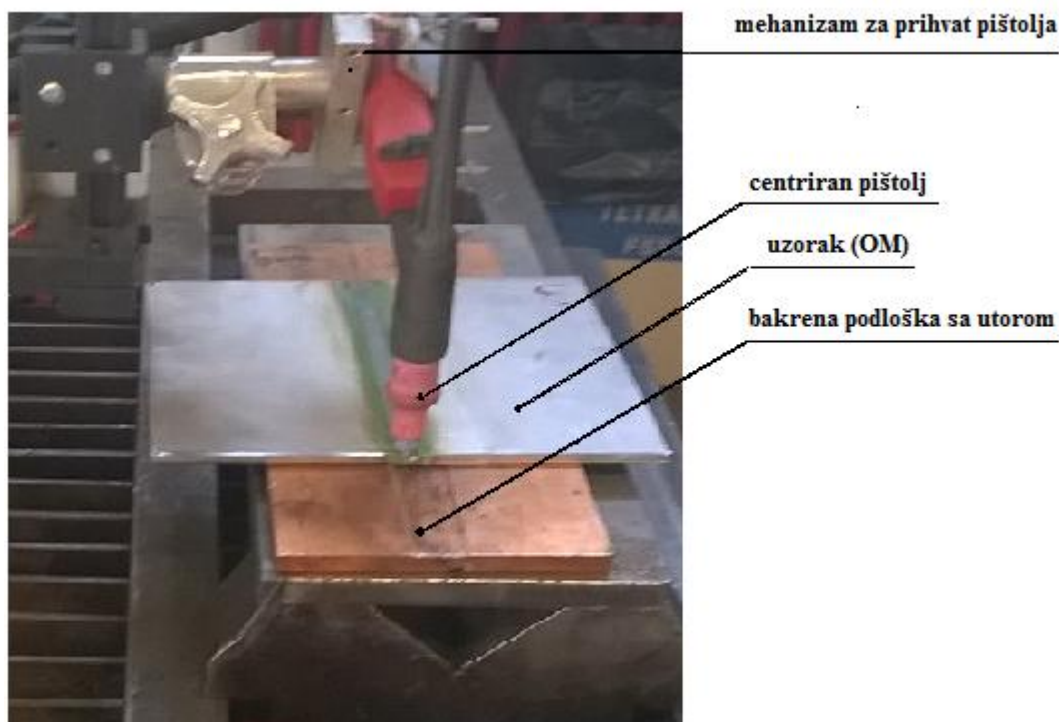
Za ovo istraživanje odabran je TIG postupak zavarivanja. Dva uzorka zavarena su konvencionalnim TIG postupkom, dok su preostala dva zavarena A-TIG postupkom uz primjenu aktivacijskog premaza. Oba uzorka zavarena se u jednom prolazu. Austenitni čelici se zavaruju istosmjernom strujom (DC) s elektrodom na (–) polu, s vrijednostima struje u intervalu od 70 – 250 A ovisno o debljini materijala i promjeru elektrode. Pričvršćivanjem

pištolja na sistem za automatiziranje postupka zavarivanja osiguravaju se isti uvjeti zavarivanja kod oba uzorka. Zavarivanje je izvedeno neutralnom tehnikom (nagib pištolja pod  $90^\circ$ ). Prije zavarivanja svakog uzorka, sve ploče osnovnog materijala očišćene su u etanolu. Na 2 uzorka nanešen je pripremljeni aktivacijski premaz kistom u jednom sloju (potezu) i to s obje strane ploča. Premazana površina ploča, premaz te pribor za nanošenje prikazani su na slici 33. Prilikom nanošenja potrebno je pripaziti na ravnomjernost debljine sloja premaza po čitavoj dužini nanošenja, a isto tako i na stražnjoj (korijenskoj) strani uzorka. Također je potrebno paziti da zazor među pločama bude što manji, te da premaz ne ulazi unutra.



Slika 33. Prikaz premazane površine uzorka, premaza te pribora za nanošenje

Nakon nanošenja premaza, uzorak se postavlja na bakrenu podlošku s plosnatim utorom dimenzija  $20 \times 0,8$  mm kako bi se mogao oblikovati korijen zavarenog spoja. Debljina bakrene podloške iznosi 10 mm. Uzorak je potrebno centrirati obzirom na navedenu bakrenu podlošku, te prema gibanju pištolja za zavarivanje. Također je potrebno učvrstiti pištolj na mehanizam za prihvrat tako da tvori kut od  $90^\circ$  prema ravnini uzorka. Prikaz radnog prostora pri zavarivanju uzorka dan je na slici 34. Prije no što počinje sam proces zavarivanja, sav etanol treba ishlapiti.



Slika 34. Prikaz radnog prostora kod zavarivanja uzorka

Kod konvencionalnog postupka zavarivanja vrijedi sve navedeno, samo što se uzorak ne premazuje aktivacijskim premazom. Također je potrebno obratiti pozornost na centriranje uzorka te na zazor između ploča, a isto tako i na pripremu, odnosno čistoću spoja koji će biti zavarivan.

### 5.5.3. Parametri zavarivanja

Glavna stavka prilikom zavarivanja jest pronaći optimalne parametre zavarivanja, odnosno optimalnu brzinu i struju zavarivanja pri kojoj bi kod A-TIG postupka, za osnovni materijal debljine 5 mm, došlo do provara korijena odnosno zavarivanja u jednom prolazu. Iz tog razloga izvršeno je preliminarno istraživanje kojim je utvrđena brzina i struja zavarivanja koja daje provaren korijen kod uzorka s premazom. Struja od 120 A pokazala se preniskom, odnosno nije došlo do protaljivanja korijena što je vidljivo na slici 35.

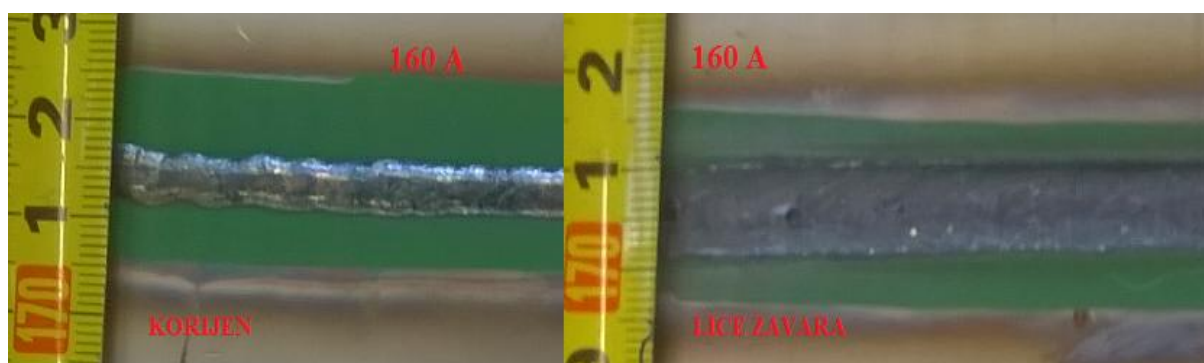




Slika 35. Nprovareni korijen kod A-TIG postupka ( 120 A)

Također je isprobano zavarivanje na ravnoj bakrenoj podlošci, ali taj način se pokazao kao nepovoljan za formiranje korijena zavora. Također je isprobana i bakrena podloška sa „U“ utorom dubine 2 mm, ali se pokazalo da je utor predubok pa dolazi do prevelikog nadvišenja korijena zavora, odnosno do tzv. propadanja taline.

U konačnici su pronađeni željeni parametri koji su dali optimalan izgled provarenog korijena zavora (slika 36.) i to kod brzine zavarivanja od 12 cm/min i vrijednosti struje od 160 A, primjenom bakrene podloške debljine 10 mm s plosnatim utorom dimenzija 20 X 0,8 mm.



Slika 36. Provaren korijen kod A-TIG postupka (160 A)

Jedini promjenjivi parametar pri zavarivanju uzoraka jest promjena napona čija se vrijednost povećava kod A-TIG postupka. Svi parametri zavarivanja dani su u tablici 14.



**Konstantni parametri** zavarivanja korišteni kod svih uzoraka su:

Protok plina: 9 l/min

Brzina zavarivanja:  $v_z = 12$  cm/min

Jakost struje:  $I = 160$  A

Zaštitni plin: 100 % Ar

Udaljenost vrha elektrode od uzorka:  $l = 3$  mm

Promjer elektrode:  $d = 2,4$  mm

Broj prolaza: 1

Bakrena podloga debljine 10 mm s plosnatim utorom dimenzija 15 x 0,8 mm

Neutralna tehnika zavarivanja (nagib pištolja od 90°)

Unos topline izračunat je prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \quad (4)$$

gdje je:

$Q$  = Unos topline [kJ/mm]

$U$  = Napon [V]

$I$  = Struja [A]

$v_z$  = Brzina zavarivanja [mm/min]

$k$  = Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja ( $k = 0,6$  za TIG postupak)

Tablica 14. Prikaza primjenjenih parametara kod zavarivanja uzoraka

| UZORAK | PREMAZ | POLARITET I<br>VRSTA<br>STRUJE | PROTOK<br>PLINA<br>[ l/min ] | BRZINA<br>ZAVARIVANJA<br>[ cm/min ] | STRUJA<br>[ A ] | NAPON<br>[ V ] | UNOS<br>TOPLINE<br>[ kJ/mm ] |
|--------|--------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| 1      | /      | DC (-)                         | 9                            | 12                                  | 160             | 13,3           | 0,639                        |
| 1A     | /      | DC (-)                         | 9                            | 12                                  | 160             | 13,4           | 0,644                        |
| 2      | DA     | DC (-)                         | 9                            | 12                                  | 160             | 15,2           | 0,729                        |
| 2A     | DA     | DC (-)                         | 9                            | 12                                  | 160             | 15,2           | 0,729                        |

### **5.5.3. Zaštitni plin**

Austenitni čelici skloni su u zoni utjecaja topline stvarati okside koji mogu uzrokovati neki od oblika korozije, a najčešće je to rupičasta korozija, pa je stoga potrebno osigurati određeni protok odgovarajućeg inertnog zaštitnog plina, koji će štititi navar tijekom zavarivanja od vanjske atmosfere. Za zaštitni plin odabran je 100 % argon. Protok zaštitnog plina kod svih zavarivanja u ovom radu iznosi 9 l/min.

### **5.5.4. Izbor elektrode**

Za potrebe eksperimenta (debljina materijala i jačina struje) odabrana je volframova elektroda legirana s torijevim oksidima. Ove elektrode odlikuju se dugim vijekom trajanja, otporne su na veće vrijednosti struje i imaju stabilan luk kod istosmjerne (DC) struje. Promjer elektrode iznosi  $d = 2,4$  [mm], a dodatni materijal se ne koristi. Električni luk dobiven ovom elektrodom ima karakteristike uske i duboke penetracije u osnovni materijal. Razmak između vrha elektrode i radnog komada iznosi 3 mm. Vrh elektrode je zašiljen kao što je vidljivo na slici 20. (poglavlje 4.5.4.).

### **5.5.5. Predgrijavanje**

Unos topline prilikom zavarivanja austenitnih čelika mora biti kontroliran i niske vrijednosti, pa se zato zavarivanje izvodi u što hladnijem stanju, pa stoga nema predgrijavanja. Međuprolazna temperatura mora biti što niža, ali taj podatak nije važan za ovaj eksperiment pošto se zavaruje samo u jednom prolazu.

## **5.6. Vizualna kontrola uzoraka**

### **5.6.1. Opis postupka**

Vizualna kontrola (VK) je metoda kontrole bez razaranja koja služi za otkrivanje niza površinskih grešaka, kao što su kontaminacija, pojava korozijskih produkata, površinske greške spojeva (površinske pukotine, nadvišenja, ulegnuća, štrcanja, obojenja zavara, krateri/ugorine...). Ispitivanje može biti sa ili bez pomoćnih uređaja i opreme. Najčešća i

najvažnija jest primjena vizualne kontrole golim okom i to, prije zavarivanja (centriranost, zazor između ploča koje se zavaruju, očišćenost žlijebova...), tijekom zavarivanja (proučavanje ponašanja taline), te nakon zavarivanja.

Prije bilo koje druge metode kontrole zavara, primjenjuje se vizualna kontrola. Ta metoda kontrole relativno je jeftina, ne oduzima puno vremena, a može dati vrlo korisne informacije o kvaliteti zavarenih spojeva, a isto tako i o nastavku kontrole nekom drugom metodom.

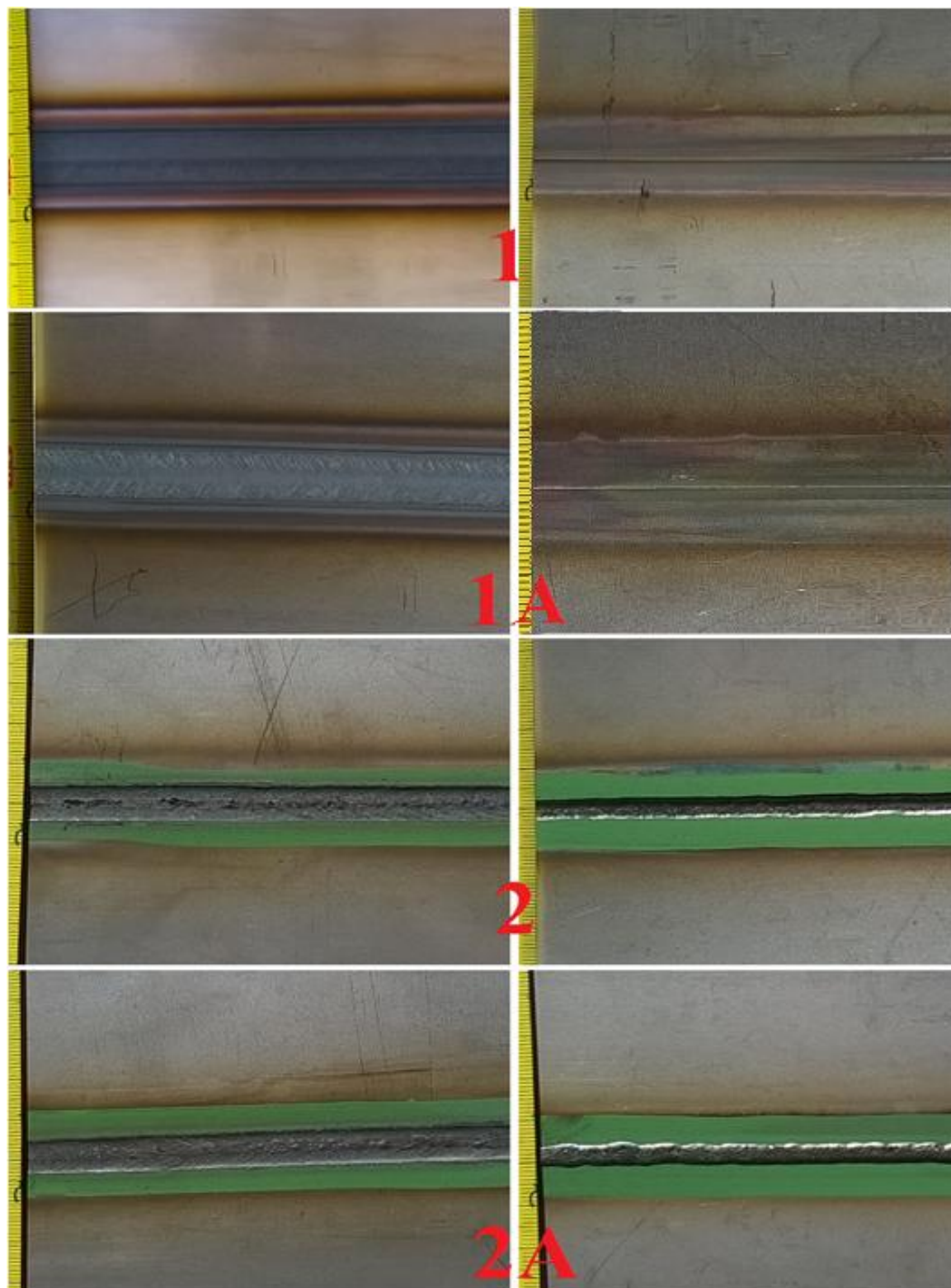
### ***5.6.2. Analiza i rezultati vizualne kontrole***

Prije zavarivanja potrebno je obratiti pozornost na čistoću pripremljenog spoja te bakrene podloške. Prije samog zavarivanja treba provjeriti je li ispario sav etanol iz premaza. Također je potrebno centrirati uzorak na utor bakrene podloške, te na putanju pištolja kako bi električni luk bio točno u sredini spoja.

Tijekom zavarivanja prati se ponašanje taline. Kod konvencionalnog TIG postupka (uzorci 1 i 1A) talina je „mirna“ i karakteristična za TIG postupak. Kod uzoraka s premazom (2 i 2A) talina je nemirna i kruži od vanjskih dijelova prema središtu zavara što odgovara teorijskom centripetalnom Marangonijevom efektu.

Izgled zavarenih spojeva sva četiri uzorka prikazan je na slici 37. Lice zavara uzoraka bez premaza izgleda estetski nešto bolje od uzoraka sa premazom, a zavar je gotovo dvostruko širi. Što se tiče obojenja površine, iz slike se vidi da uzorci sa premazom nemaju ni približno toliko obojenja kao što imaju uzorci bez premaza. Navedena svojstva bi se mogla pripisati primjeni premaza, koji iako daje veći unos topline, očito dovodi do koncentriranijeg (užeg) električnog luka (topline) te tako sužava područje metala zavara i zone utjecaja topline, a samim time i manje područje obojenja (stvaranje oksida).

Što se tiče površinskih grešaka vidljivo je samo ulegnuće kod uzoraka kod kojih je primjenjen premaz, što bi se moglo pripisati propadanju taline kako bi se formirao korijen zavara, a isto tako nema ni dodatnog materijala. Kod uzoraka 1 i 1A vidi se da nije došlo do provara korijena, pa stoga nema ni ulegnuća lica zavara.

**Lice zavara****Korijen zavara**

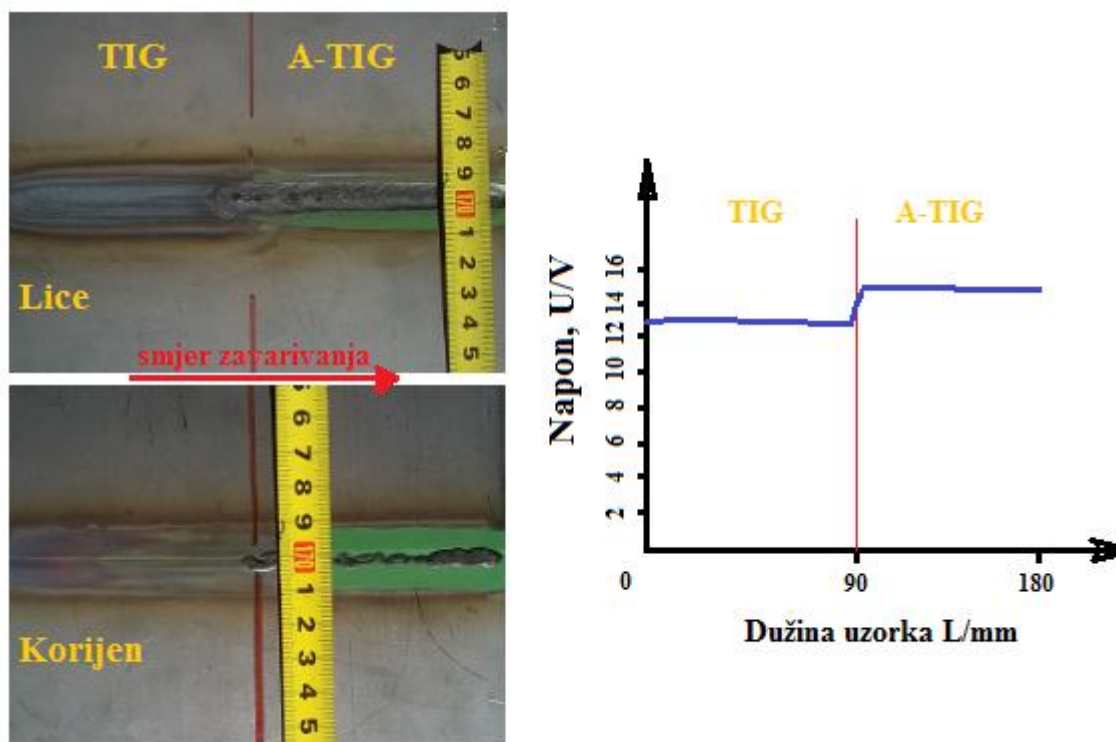
Slika 37. Izgled lica i korijena zavarenih uzoraka

Kod uzoraka 1 i 1A došlo je i do deformacija tijekom zavarivanja i hlađenja zavara. Kao što se može vidjeti na slici 38. Deformacija (progib) kod uzorka 1, gdje nije primjenjen premaz, iznosi približno 3,5 mm, dok kod uzorka 2 deformacije nema. Razlog nastajanja deformacija pri zavarivanju je najčešće visok unos topline. Iako je unos topline kod uzorka 2 bio nešto viši, deformacije nisu vidljive. To se može pripisati primjeni aktivacijskog premaza koji sužava električni luk, pa je samim time uži (fokusiraniji) i unos topline. Toplina je više orijentirana na prodiranje kroz poprečni presjek zavara, dok kod konvencionalnog TIG postupka dolazi do raspršivanja topline na širem dijelu radnog komada i jačeg zagrijavanja cijele površine uzorka, odnosno osnovnog materijala, što dovodi do deformacija.



Slika 38. Usporedba deformacija zavarenih uzoraka

Uzorak 3 izrađen je samo za potrebe usporedbe promjene vrijednosti napona kod oba postupka zavarivanja. Uzorak je do pola zavaren konvencionalnim TIG postupkom, a druga polovica A-TIG postupkom. Svi parametri zavarivanja koji su krišteni kod uzorka 3 isti su kao i kod prethodnih uzoraka (tablica 14.), osim vrijednosti napona. Iz slike 39. vidi se porast napona na sredini ploče gdje se prelazi iz jednog postupka u drugi. Kod konvencionalnog postupka maksimalni napon je iznosio 13,3 V, a kod A-TIG postupka 15,2 V. Prelaskom na A-TIG postupak zavarivanja dolazi do porasta vrijednosti napona te suženje električnog luka što doprinosi većoj penetraciji.



Slika 39. Prikaz promjene vrijednosti električnog luka

Što se tiče samog izgleda korijena zavora, kod uzoraka s premazom, nisu vidljive nikakve površinske greške. Oblik zavora poprimio je oblik utora bakrene podloške. Na temelju vizualnih opažanja može se zaključiti da je moguće koristiti aktivacijski premaz kao korijensku zaštitu umjesto plina.

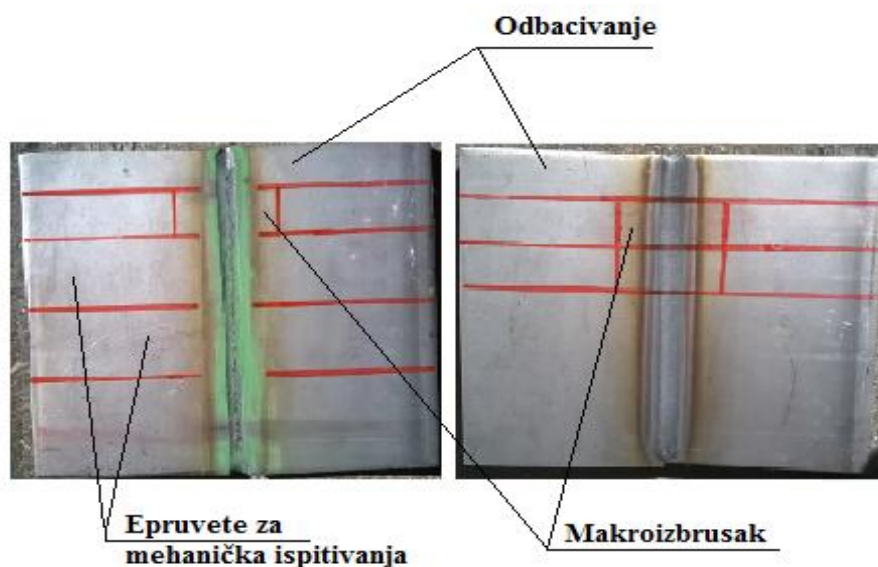
## 5.7. Makroanaliza

### 5.7.1. Priprema uzoraka

Za ispitivanje geometrijskih značajki zavora izrađeni su makroizbrusci poprečnih presjeka slijedom tehnoloških operacija:

1. Rezanje uzoraka na dimenziju 25 x 50 x 5 mm na tračnoj pili s vodenim hlađenjem za makrostrukturno ispitivanje. Iz radnih komada 1 i 2 pripremljen je po jedan makroizbrusak. Uzorci su izrezani iz ploča prema normi HRN EN ISO 15614-1 kao što prikazuje slika 40.

Prvih i zadnjih 25 mm zavarene ploče se odbacuje zbog mogućih grešaka na početku i kraju zavarivanja.

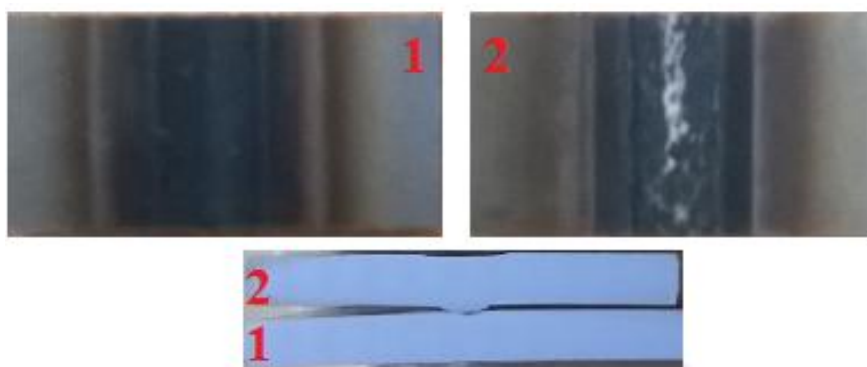


Slika 40. Pozicije izrezivanja uzoraka za ispitivanje

2. Nakon rezanja uzoraka na naznačene mjere uslijedio je proces brušenja uzoraka. Brušena je jedna odabrana strana svakog od uzoraka za ispitivanje. Površina makrouzoraka očišćena je od prisutnosti srha i grubo izbrušena na rotirajućem disku hrapavosti P80, P160 i P280.

3. Zatim su uzorci predani u Laboratorij za metalografiju gdje su ispolirani nizom brusnih papira do vrijednosti hrapavosti P4000.

4. Elektrokemijsko nagrivanje u 10% oksalnoj kiselini -  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  u vremenskom intervalu od 40 s, pri naponu 12 V i struji 2 A. Prekid reakcije nagrivanja izvršen je ispiranjem uzoraka u toploj vodi. Slika 41. prikazuje pripremljene uzorke za makroanalizu.



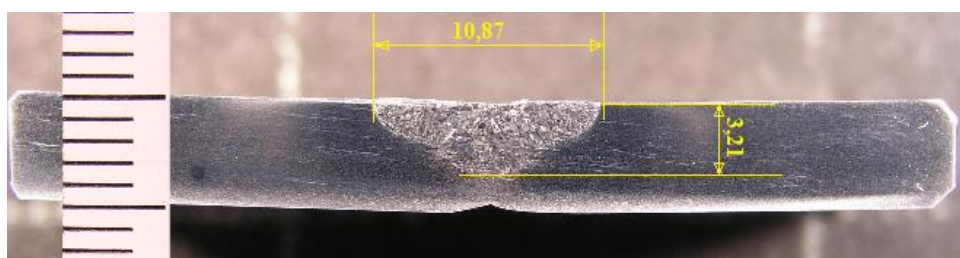
Slika 41. Pripremljeni uzorci za makroanalizu



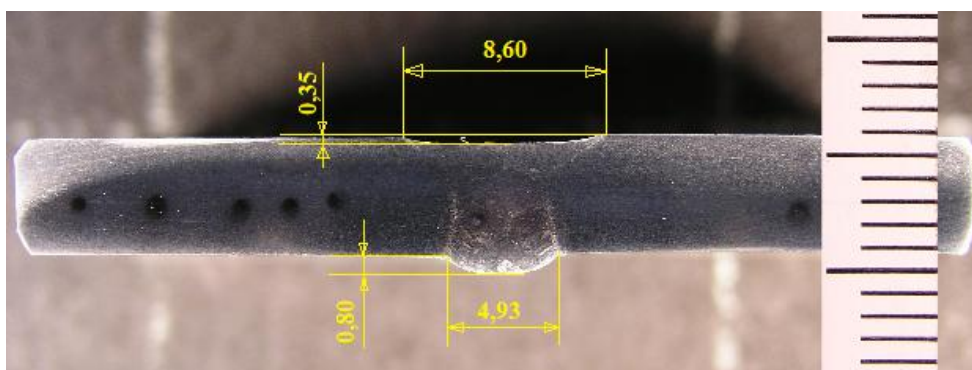
### 5.7.2. Rezultati i analiza

Izradom makroizbrusaka dobiva se uvid u geometriju zavarenog spoja, zonu taljenja materijala te intenzitet taljenja osnovnog materijala. Ispitivanje se sastoji od vizualnog pregleda poprečnih presjeka uzoraka ili pomoću mikroskopa s manjim povećanjem.

Kod makrostrukturnih ispitivanja izmjerena su nadvišenja i širine lica i korijena zavora na uzorcima i prikazana su za oba uzorka na slici 42.



a) uzorak 1 (bez aktivacijskog premaza)



b) uzorak 2 (uz primjenu aktivacijskog premaza)

Slika 42. Mjerenje geometrijskih veličina na uzorcima

Kod oba uzorka nisu vidljive nikakve nehomogenosti po poprečnom presjeku, odnosno greške u metalu zavora.

Iz slike 42.a se vidi da je penetracija slaba, odnosno da nije došlo do provarivanja korijena. Dubina penetracije kod uzorka 1 iznosi svega 3,21 mm, dok je kod uzorka 2 protaljen čitav osnovni materijal, čija debljina iznosi 5 mm. Kod uzorka 1 je ostalo neprotaljeno čak 35 % debljine osnovnog materijala. Na uzorku 2 je također vidljivo i ulegnuće do kojeg je došlo



zbog nekorištenja dodatnog materijala, odnosno zbog propadanja taline u korijen zavora (popuna utora bakrene podloške).

Što se tiče širine lica zavora, iz slike 42 je vidljivo da je kod uzorka 1 nešto šire i iznosi 10,87 mm. Kod uzorka 2 širina lica zavora iznosi 8,60 mm, što je 20 % manje u odnosu na uzorak 1. Kao što je već spomenuto ranije, razlog tome je vjerojatno suženje električnog luka uslijed djelovanja aktivacijskog premaza.

### 5.8. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Ovim se ispitivanjem ujedno određuju i osnovna mehanička svojstva osnovnog materijala i metala zavora kao što su granica razvlačenja i vlačna čvrstoća. Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice, na kojima se epruvete kontinuirano opterećuju sve dok ne dođe do loma. Statičko vlačni pokus izveden je na kidalici EU 40 mod, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prema normi EN 10002. Navedena kidalica prikazana je na slici 43. Na početku ispitivanja potrebno je unijeti sve potrebne parametre poput brzine ispitivanja, poprečnog presjeka epruvete, temperature... Parametri se unose u računalni program koji upravlja kidalicom.

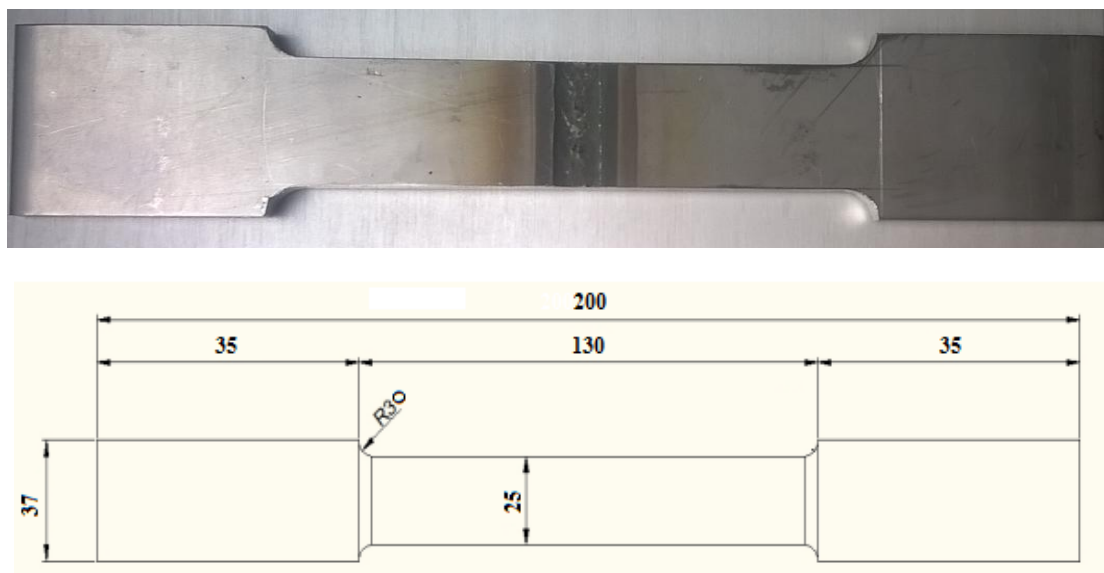


Slika 43. Kidalica EU 40 mod

### 5.8.1. Priprema uzoraka

Uzorci su izrezani samo iz uzoraka 2 i 2A (uz primjenu aktivacijskog premaza) i to prema normi HRN EN ISO 15614-1, kako je prikazano na slici 40. Kod uzorka 1 i 1A nema potrebe provoditi statičko vlačni pokus jer se već vizualnom kontrolom utvrdilo da zavari nisu funkcionalni, odnosno da korijeni nisu provareni.

Nakon što su uzorci za statičko vlačno ispitivanje tračnom pilom izrezani iz zavarenih ploča 2 i 2A (po 1 iz svake ploče), dani su na strojnu obradu. Iz tih uzorka izrezuju se plosnate epruvete dimenzija određenih prema normi EN 895:1995 (slika 44.). Korijen zavora je brušenjem poravnat s ravninom osnovnog materijala.



Slika 44. Epruveta za statičko vlačni pokus

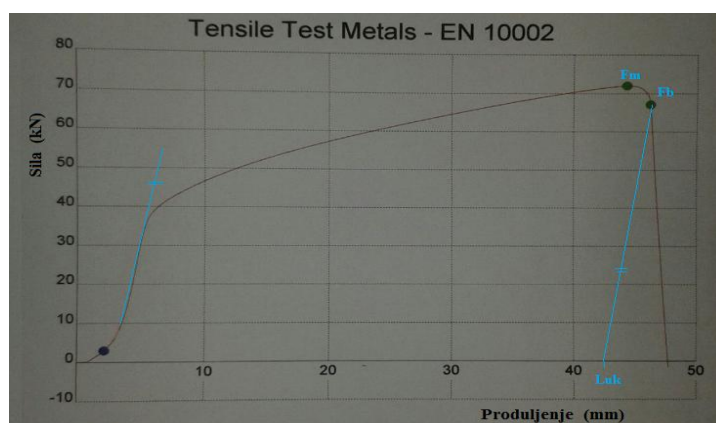
### 5.8.2. Rezultati i analiza

Statičkim vlačnim pokusom (EN 10002) ispitane su dvije epruvete izrezane iz zavarenih ploča s primjenom aktivacijskog premaza. Obje ispitivane epruvete dale su iste rezultate. Izgled epruveta nakon izvršenog statičko vlačnog pokusa (slika 45.). Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi iznosa približno 25 °C.



Slika 45. Izgled epruvete nakon kidanja

Iz slike 45. je vidljivo da su obje epruvete pukle na samoj sredini uzorka, odnosno u metalu zavora. Kod epruvete 2 (iz uzorka 2 A), na samom kraju ispitivanja, došlo je do iskliznuća jedne strane iz čeljusti kidalice, a dobiveni rezultati su isti kao i kod prve epruvete (iz uzorka 2). Pošto je došlo do loma u metalu zavora, može se konstatirati da isti ima manju vlačnu čvrstoću od osnovnog materijala. Razlozi takvog ishoda mogu biti u eventualnoj prisutnosti uključaka nastalih od premaza ili samo stanjenje stijenke u području metala zavora gdje je došlo do ulegnuća koje je opisano kod makroanalize uzorka. Iako je došlo do pucanja u području metala zavora, ne znači da je zavar loše izveden, jer je izmjerena vrijednost vlačne čvrstoće zavora visoka i iznosi  $R_m = 576,6 \text{ N/mm}^2$ . Teorijska vlačna čvrstoća osnovnog materijala kreće se u rasponu od 450 do  $700 \text{ N/mm}^2$  kao što je navedeno u tablici 12.



Slika 46. Dijagram sila-produljenje dobiven statičko vlačnim pokusom

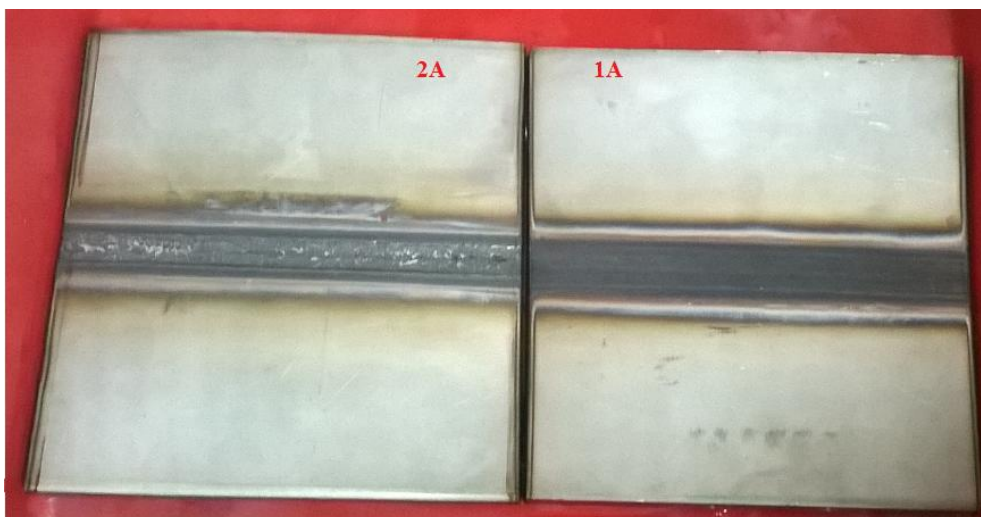
Iz slike 46. vidi se da je do pucanja epruveta došlo kod sile  $F_b$  iznosa 67,14 kN, dok sila  $F_m$  iznosa 72,07 kN predstavlja silu najveće vrijednosti kod koje je izmjerena vlačna čvrstoća. Iz slike se također vidi da ukupno produljenje epruvete ( $L_{uk}$ ) nakon ispitivanja iznosi 42 mm.

## 5.9. Korozijsko ispitivanje

Korozijsko ispitivanje je provedeno s ciljem utvrđivanja otpornosti na pojavu rupičaste korozije. Ispitivanje je provedeno uranjanjem uzoraka u 10%-tnu otopinu željezovog (III) klorid-heksahidrata ( $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Vrijeme uranjanja iznosilo je 48 sati, pri sobnoj temperaturi iznosa  $25^\circ\text{C}$ . Uzorci su nakon uranjanja prekriveni plastičnim pokrovom kako ne bi bili u doticaju sa svjetlošću.

### 5.9.1. Priprema uzoraka

Uzorci za korozijska ispitivanja su izrezani plazma postupkom iz zavarenih ploča 1A i 2A. Uzorci se prije uranjanja čiste etanolom kako bi se uklonili ostaci premaza, obrisi markera te prisutne masnoće. Navedena faza je veoma bitna za ispitivanje jer navedene stvari dovode do bržeg nastanka rupičaste korozije, što bi moglo bitno utjecati na dobivene rezultate. Dimenzije uzoraka za korozijsko ispitivanje iznose  $130 \times 130 \text{ mm}$ . Na slici 47. prikazan je izgled uzoraka prije uranjanja u agresivnu otopinu  $\text{FeCl}_3$ .



Slika 47. Pripremljeni uzorci prije uranjanja u agresivnu otopinu  $\text{FeCl}_3$

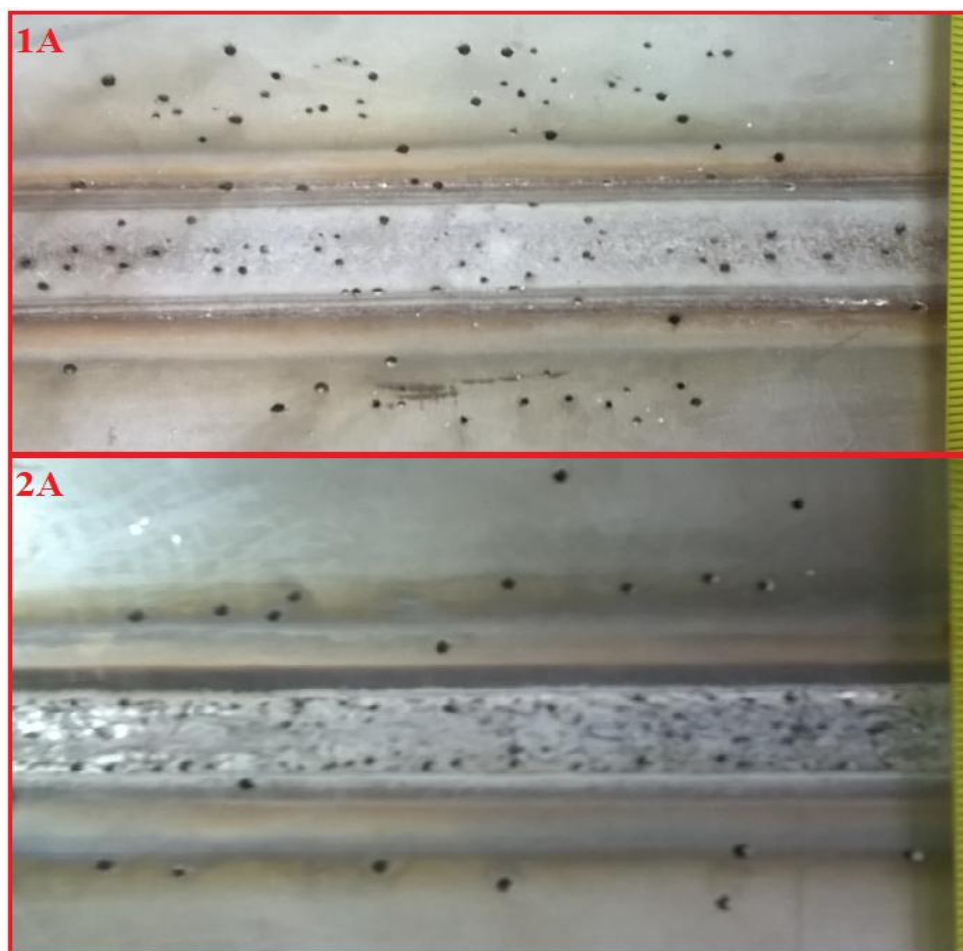
### 5.9.2. Rezultati i analiza

Na slici 48. prikazan je sam početak ispitivanja, odnosno uranjanje uzoraka u agresivnu otopinu. Uzorci su umetnuti tako da su lica zavara prema gore odnosno u doticaju s otopinom. Vizualnim promatranjem, već nakon nekoliko sati od početka ispitivanja vidi se da je došlo do reakcije između ispitivanih uzoraka i agresivne otopine. Početna zlatno-smeđa boja željeznog klorida počela je tamniti.



Slika 48. Uzorci uronjeni u agresivnu otopinu

Nakon 48 sati ispitivanja uzorci su izvađeni iz otopine željeznog klorida. Uzorci se nakon vađenja iz otopine ispiru pod mlazom mlake vode. Nastale rupice na uzorcima čiste se iglom pod mlazom vode kako kasnije ne bi došlo do iscjeđivanja korozijskih produkata iz istih. Na kraju je potrebno uzorke dobro osušiti kako bi se dalje mogla vršiti ispitivanja. Prilikom čišćenja rupica (pitova) potrebno je paziti da se ne grebe površina uzorka kako prilikom ocjenjivanja izgleda površine ne bi došlo do zabune pa se neka ogrebotina proglasila korozijskim oštećenjem. Izgled uzoraka nakon 48 sati uranjanja u otopini prikazan je na slici 49.



Slika 49. Izgled uzoraka nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj otopini

Iz slike 49. vidljivo je da je kod uzorka 1A koji je zavaren konvencionalnim TIG postupkom, nastalo mnogo više rupica (pitova) u svim dijelovima zavora (metal zavora i zona utjecaja topline). Ako se uspoređuje sam metal zavora, kod uzorka 2A vidljive su rupice samo na rubovima, dok su kod uzorka 1A one raspoređene po cijeloj površini metala zavora i nešto većeg promjera.

Također ako se promatra osnovni materijal, vidljivo je da ima puno manji broj pitova kod uzorka 2A, za razliku od uzorka 1A što bi se moglo pripisati već spomenutom koncentriranijem unosu topline kod uzorka 2A. Maksimalne dimenzije (promjer) pojedinih pitova kod oba uzorka dosežu vrijednost do čak 2,5 mm.

Prema dobivenim rezultatima zaključuje se da zavar dobiven primjenom aktivacijskog premaza kod A-TIG zavarivanja ima veću otpornost prema nastanku rupičaste korozije, od onog koji je zavaren konvencionalnim TIG postupkom.



Kemijski sastav metala zavara ispitan je u Laboratoriju za zaštitu materijala korištenjem prijenosnog uređaja Olympus InnovX (slika 50.).



Slika 50. Mjerenje kemijskog sastava uređajem Olympus InnovX

Navedenim uređajem izvršeno je mjerenje kemijskog sastava poprečnog presjeka metala zavara na oba uzorka prije i nakon nagrizanja u agresivnoj otopini kako bi se preko kemijskog sastava utvrdio uzrok povećane otpornosti na rupičastu koroziju kod uzorka 2A.

Tablica 15. Kemijski sastav metala zavara uzoraka prije i nakon nagrizanja

| Kemijski element<br>(maseni udio) | Si<br>(%) | V<br>(%) | Cr<br>(%) | Mn<br>(%) | Fe<br>(%) | Ni<br>(%) | Cu<br>(%) | Mo<br>(%) |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1A prije nagrizanja               | 0,38      | 0,11     | 18,46     | 1,45      | 70,91     | 8,12      | 0,56      | 0,074     |
| 1A nakon nagrizanja               | 0,34      | 0,11     | 18,11     | 1,48      | 71,82     | 8,09      | 0,43      | 0,076     |
| 2A prije nagrizanja               | 4,98      | 0,18     | 20,92     | 4,54      | 60,18     | 8,26      | 0,46      | 0,064     |
| 2A nakon nagrizanja               | 2,85      | 0,11     | 18,96     | 1,46      | 68,90     | 7,69      | 0,42      | 0,069     |

U tablici 15. prikazan je kemijski sastav metala zavara oba uzorka prije i nakon nagrivanja u agresivnoj otopini željeznog klorida. Kod uzorka 1A (bez primjene premaza) nema velikih razlika u kemijskom sastavu prije i nakon nagrivanja. Došlo je do smanjenja udjela silicija i kroma, dok je udio željeza malo porastao. Navedene promjene su zanemarive ako se usporede s uzorkom 2A. Kod uzorka 2A (primjena premaza) razlike su više nego očite. Kemijski sastav metala zavara prije nagrivanja ima i do 10 puta veći udio silicija, 4 puta veći udio mangana, te veći udio kroma za 3 %, a udio željeza osjetno manji naspram uzorka 1A. Navedeni udjeli kroma i silicija povećani su najvjerojatnije zbog ugradnje tih elemenata iz premaza u metal zavara.

Nakon nagrivanja u agresivnoj otopini sve navedene vrijednosti se smanjuju na približne vrijednosti uzorka 1A, dok je udio kroma i silicija ostao nešto viši naspram istog. Već navedena povećana otpornost uzorka 2A na rupičastu koroziju naspram uzorka 1A mogla bi se pripisati povišenom udjelu kroma.



## 6. ZAKLJUČAK

Austenitni visokolegirani nehrđajući čelici, svoja antikorozijska svojstva duguju ponajprije visokom udjelu kroma u svom kemijskom sastavu. Obilježava ih minimalni udio kroma od 10,5 % kao i dodatak ostalih legirajućih elemenata poput nikla, molibdena, titana, dušika, kojima se bilo modificira njihova struktura, ili postižu bolja svojstva. U ovom radu korišten je osnovni materijal od nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 304 debljine 5mm. Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi utjecaj aktivacijskog premaza na mehanička i korozijska svojstva zavrenog spoja austenitnog čelika.

Kod zavarivanja uzoraka za ispitivanja korišten je konvencionalan TIG i A-TIG postupak zavarivanja. Automatizacijom postupka zavarivanja postiže se dosljednost i ponovljivost procesa kod svih uzoraka, a isključuje se faktor ljudskog utjecaja. Na temelju prijašnjih, dostupnih istraživanja odabrane su praškaste komponente premaza koje su dale najbolja svojstva penetriranja, a to je mješavina  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  s etanolom. Glavni razlozi primjene aktivacijskih premaza kod TIG zavarivanja su smanjenje nadostataka konvencionalnog TIG zavarivanja kao što su slaba penetracija i mala brzina zavarivanja. Primjena aktivacijskog premaza, prema dostupnim istraživanjima, prvenstveno služi za povećanje penetracije koje teoretski iznosi i do 300 % naspram konvencionalnog TIG zavarivanja. Kao glavni razlog navedenog povećanja jest taj da aktivacijski premaz povisuje napon kojim se ujedno povećava i unos topline, a električni luk se sužava što dovodi do dublje penetracije.

U eksperimentalnom dijelu rada dokazana je teza o povećanju penetracije time što je kod uzorka s primjenom premaza došlo do provara korijena, a pri istim parametrima zavarivanja kod konvencionalnog postupka nije.

Mehanička svojstva zavrenog spoja A-TIG postupkom pokazala su se zadovoljavajuća što znači da je vlačna čvrstoća zavara približno jednaka čvrstoći osnovnog materijala i iznosi  $576 \text{ N/mm}^2$ . Makroanaliza uzorka s primjenom premaza je također zadovoljila, odnosno nije bilo vidljivih grešaka na porečnom presjeku metala zavara.

Također je potvrđena mogućnost zaštite korijena zavara primjenom aktivacijskog premaza umjesto zaštitnog plina.

Što se tiče korozijske postojnosti, uzorci s primjenom premaza pokazali su višu korozijsku otpornost na rupičastu koroziju, što daje još jednu prednost primjene premaza.

Na kraju se može zaključiti da je A-TIG postupak primjenjiv za zavarivanje nehrđajućih visokolegiranih austenitnih čelika zbog bolje korozijske postojanosti, veće produktivnosti te gotovo trostruko veće penetracije od konvencionalnog TIG postupka. Troškovi primjene premaza su zanemarivi naspram dobivenih prednosti, a pogotovo kod zavarivanja velikih serija proizvoda gdje je potrebna veća brzina zavarivanja, odnosno veća produktivnost.

## 7. LITERATURA

- [1] ...: [http://www.konimb.hr/blog/sto\\_je\\_inox.html](http://www.konimb.hr/blog/sto_je_inox.html), dostupno 11.10.2015.
- [2] Juraga I., Šimunović V.; Stojanović I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje“, Pula, 2007.
- [3] ...: <https://app.aws.org/wj/1998/11/kotecki/>, dostupno 11.10.2015.
- [4] ...: [http://www.aksteel.com/markets\\_products/stainless.aspx#austenitic](http://www.aksteel.com/markets_products/stainless.aspx#austenitic), dostupno 12.10.2015
- [5] ...: [http://www.konimb.hr/blog/sto\\_je\\_inox.html](http://www.konimb.hr/blog/sto_je_inox.html), dostupno 12.10.2015.
- [6] ...: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1354629739-0-ssnc\\_7i8\\_pred\\_tekst.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf), dostupno 12.10.2015.
- [7] ...: <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf>, dostupno 12.10. 2015.
- [8] Juraga I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [9] ...: <http://www.strojopromet.com/inox/>, dostupno 12.10.2015.
- [10] ...: Austenitic Stainless Steels, [http://www.asminternational.org/documents/10192/3473958/05231G\\_Sample.pdf/7c5e4830-b443-4c71-a8c8-1a85c5b39dc5](http://www.asminternational.org/documents/10192/3473958/05231G_Sample.pdf/7c5e4830-b443-4c71-a8c8-1a85c5b39dc5), dostupno 12.10.2015.
- [11] ...: <http://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/glavne-karakteristike-najznacajnijih-nehrdjajucih-celika-inox.html>, dostupno 16.10.2015.
- [12] ...: <http://www.strojopromet.com/inox/>, dostupno 16.10.2015.
- [13] ...: <http://www.gowelding.com/met/austenitic.html>, dostupno 16.10.2015
- [14] ISO 4063 : 2009 – Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers, BSI, 2009.
- [15] ...: Strojevi i oprema za zavarivanje, podloge, Zagreb, 2013, [http://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/05\\_12\\_2013\\_\\_19939\\_STROJEVI\\_I\\_OPR,EMA\\_ZA\\_ZAVARIVANJE\\_ZK\\_PiO-1.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/05_12_2013__19939_STROJEVI_I_OPR,EMA_ZA_ZAVARIVANJE_ZK_PiO-1.pdf), dostupno 16.10.2015.
- [16] Tehnička enciklopedija br. 1, JLS, Zagreb, 1988.
- [17] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [18] ...: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/equipment-for-tungsten-inert-gas-tig-gta-welding-017/>, dostupno 17.10.2015.
- [19] Milotić M.: PRIRUČNIK ZA ZAVARIVAČE 2, Saobraćajni fakultet, Doboj, 2008., str. 68
- [20] ...: <http://www.industrysearch.com.au/Products/TIG-Cold-Wire-Feeder-Model-TIGer>

- Process-TP1002-76980, 19.10.2010.
- [21] Živčić M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985., broj 2, 99 – 107 str.
- [22] Juraga I.; Živčić M.; Gracin M.: Reparturno zavarivanje, vlastita naklada, Zagreb, 1994.
- [23] Crnalić N.: Zavarivanje u zaštiti plinova netaljivom elektrodom – TIG – Glavna obilježja i područja primjene, DTZI – seminar, Pula, 2005.
- [24] ...: [http://www.messergroup.com/mostar/O\\_nama/Za\\_\\_titni\\_plinovi\\_za\\_zavarivanje\\_.pdf](http://www.messergroup.com/mostar/O_nama/Za__titni_plinovi_za_zavarivanje_.pdf), dostupno 21.10.2015.
- [25] Čordaš D.: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), 4. seminar, Pula 2007.
- [26] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, AWS, 1987.
- [27] ...: <http://www.everlastgenerators.com/advantages-of-tig-welding-machines.php>, dostupno 21.10.2015.
- [28] ...: PRODUKTKATALOG, 2014/15, <http://www.zultner.at/lieferprogramme/wig.pdf>, dostupno 21.10.2015.
- [29] ...: <http://www.gemtradedoo.com/tig-elektrolucno-zavarivanje-ono-sto-bi-svi-trebalo-da-znaju>, dostupno 21.10.2015.
- [30] O'Brien R. L.: Welding Handbook, Welding processes, eighth edition, vol.2, Miami, 1991.
- [31] Živčić M.: TIG zavarivanje, Časopis zavarivanje 1/2/3/, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, FSB, Zagreb, 1985.
- [32] ...: <http://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook/>, dostupno 21.10.2015.
- [33] ....: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-investigation-into-arc-constriction-by-active-fluxes-for-tig-a-tig-welding-2000/>, dostupno 27.10.2015.
- [34] ....: [http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue8/IJETAE\\_0814\\_25.pdf](http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue8/IJETAE_0814_25.pdf), dostupno 27.10.2015.
- [35] Ruckert G.; Perry N.; Sire S.; Marya S.: Enhanced Weld Penetrations In GTA Welding with Activating Fluxes Case studies: Plain Carbon & Stainless Steels, Titanium and Aluminum, THERMEC 2013, United States., pp-202, 2013.
- [36] Muthukumaran V.; Nadu T.; Bhaduri A. K.: Penetration enhancing Flux formulation for Tungsten Inert Gas (Tig) Welding of Austenitic Stainless Steel and its

- Application, United States Patent, Patent No.: US 8,097,826 B2, Jan. 17, 2012.
- [37] ...: <http://trade.indiamart.com/details.mp?offer=8611459597>, dostupno 28.10.2015.
- [38] ...: <http://www.hisltd.co.uk/Patig-S-A-Penetration-Improving-Spray-Flux-100ml.html>  
dostupno 28.10.2015
- [39] ...: <http://www.hisltd.co.uk/Weldability-Sif-Stainless-Steel-Flux-1lb-Tub.html>,  
dostupno 28.10.2015
- [40] Huang, H. Y.; Shyu, S. W.; K. H. Tseng, K. H.; Chou, C. P.: Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, No. 5, 2005.
- [41] ...: <http://www.att.bme.hu/~femtech/letoltes/duplex-Dobranszky-2007.pdf>, dostupno 28.10.2015.
- [42] Tseng K.H.; Hsu C.Y.: Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, *Journal of Materials Processing Technology*, (2011), 503–512, 2011.
- [43] ....: <http://documents.tips/documents/atig-zavarivanje-55a758ab23a2e.html>, dostupno 29.10. 2015.
- [44] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB Zagreb, 2007
- [45] ...: <http://www.rapidwelding.com/dynamic/DisplayItem.aspx?c=4%2C075%2C119>,  
dostupno 30.10.2015.